



Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti.

Citation

Vinha, J., Laukkanen, A., Kaasalainen, T., Pihlajamaa, P., Teriö, O., Jokisalo, J., ... Uusitalo, S. (2019). Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. (Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti; Nro 168). Tampereen teknillinen yliopisto.

Year

2019

Version

Publisher's PDF (version of record)

Link to publication

[TUTCRIS Portal \(http://www.tut.fi/tutcris\)](http://www.tut.fi/tutcris)

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright, please contact cris.tau@tuni.fi, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio.
Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 168
Tampere University of Technology. Laboratory of Civil Engineering.
Structural Engineering. Research report 168

Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Tapio Kaasalainen, Pirkko Pihlajamaa, Olli Teriö, Juha Jokisalo, Petri Annala, Pirkko Harsia, Markku Hedman, Juhani Heljo, Kari Kallioharju, Antti Kauppinen, Paavo Kero, Henna Kivioja, Taru Lehtinen, Tero Marttila, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Jukka Paatero, Tuomas Raunima, Annu Ruusala, Paula Sankelo, Pauli Sekki, Kai Sirén, Eero Tuominen, Olli Tuominen, Ulrika Uotila & Sakari Uusitalo

Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti.



Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka.
Tutkimusraportti 168
Tampere University of Technology. Laboratory of Civil Engineering. Structural
Engineering. Research Report 168

Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Tapio Kaasalainen, Pirkko Pihlajamaa, Olli Teriö, Juha Jokisalo, Petri Annala, Pirkko Harsia, Markku Hedman, Juhani Heljo, Kari Kallioharju, Antti Kauppinen, Paavo Kero, Henna Kivioja, Taru Lehtinen, Tero Marttila, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Jukka Paatero, Tuomas Raunima, Annu Ruusala, Paula Sankelo, Pauli Sekki, Kai Sirén, Eero Tuominen, Olli Tuominen, Ulrika Uotila & Sakari Uusitalo

Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti.

ISBN 978-952-15-4305-0 (nid.)
ISBN 978-952-15-4306-7 (PDF)
ISSN 2489-6950



Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Tapio Kaasalainen, Pirkko Pihlajamaa, Olli Teriö, Juha Jokisalo, Petri Annala, Pirkko Harsia, Markku Hedman, Juhani Heljo, Kari Kallioharju, Antti Kauppinen, Paavo Kero, Henna Kivioja, Taru Lehtinen, Tero Marttila, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Jukka Paatero, Tuomas Raunima, Annu Ruusala, Paula Sankelo, Pauli Sekki, Kai Sirén, Eero Tuominen, Olli Tuominen, Ulrika Uotila & Sakari Uusitalo

COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF NEARLY ZERO-ENERGY MUNICIPAL SERVICE BUILDINGS (COMBI). TUTKIMUSHANKKEEN JOHDANTO- JA YHTEENVETORAPORTTI

Tutkimusraportti 168, 45 s. + 111 liites.

Tammikuu 2019

Hakusanat: arkkitehtuuri, energiankulutus, energiatehokkuus, ikkunat, kenttämittaukset, kosteustekninen toiminta, laskennallinen tarkastelu, lämmitysjärjestelmä, lämmöneristys, optimointi, palvelurakennukset, rakennusfysiikka, sisäilman olosuhteet, talotekniikka, tilasuunnittelu, vaipparakenteet, valaistus

Tiivistelmä

Tässä COMBI-tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportissa esitetään vuosina 2015–2018 toteutetun tutkimushankkeen keskeiset suositukset ja johtopäätökset. Hankkeen tavoitteena on ollut parantaa julkisten palvelurakennusten, kuten koulujen, päiväkotien ja vanhainkotien energiatehokkuutta turvallisesti ja kustannustehokkaasti. Hankkeessa on tarkasteltu sekä uudis- että korjausrakentamista.

Tutkittuja aihepiirejä on hankkeessa ollut suuri määrä. Arkkitehtuurin osalta on tarkasteltu palvelurakennusten arkkitehtisuunnittelun kehittämistä energiatehokkuuden ja tilasuunnittelun näkökulmista sekä ympäristöystävällisyyden ja kestävyys huomioon ottamista arkkitehtisuunnittelussa. Rakenteiden osalta on tutkittu niiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa ja määritetty kosteusteknisiä materiaaliominaisuuksia. Kenttätutkimuksissa on tarkasteltu sisäilman olosuhteita 24 palvelurakennuksessa Tampereen ja ympäristökuntien sekä Helsingin alueella. Myös palvelurakennusten laskennallista ja toteutunutta energiankulutusta on tutkittu Tampereen, Helsingin ja Oulun kohteista. Taloteknisten järjestelmien osalta on tarkasteltu niiden kustannusoptimaalisuutta, uusiutuvan energian etätuotantoa, taloautomaatiojärjestelmien toimintaa, aurinkosuojausta ja valaistusta. Rakennusprosessin osalta näkökulmina ovat olleet päätöksenteon prosessit, talotekniikan käytännön toteutus, rakennuksen toimivuuden varmistus sekä olosuhteiden ja energiankulutuksen seuranta. Lisäksi on kehitetty työkaluja rakennushankkeen taloudellisuustarkasteluihin.

Tämän johdanto- ja yhteenvetoraportin liitteenä on hankkeen tulosten pohjalta koottu COMBI 8 -suosituslista, jossa esitettyjen toimenpiteiden katsotaan laajasti edesauttavan julkisten palvelurakennusten toimivuutta ja energiatehokkuutta. Raportin liitteenä on myös 45 kpl lyhyitä tuloskortteja sekä niihin liittyvät esitysaineistot, joiden tarkoituksena on helpottaa hankkeessa kerätyn tiedon leviämistä. Hankkeen alkuperäisjulkaisut on listattu tämän raportin liitteenä olevassa julkaisuluettelossa.

Keskeisenä johtopäätöksenä todetaan, että hyvä energiatehokkuus on ainoastaan yksi laadukkaan rakentamisen monista ominaisuuksista. Laadukas rakentaminen edellyttää kokonaisvaltaista ja oikea-aikaista asioiden tarkastelua sekä ehjän ketjun rakentamista suunnittelusta toteutukseen ja käyttöön. Tässä onnistumisen edellytyksenä ovat rakennushankkeessa ja sen jälkeen rakennuksen parissa toimivien henkilöiden hyvä ammattitaito ja yhteistyö sekä riittävät resurssit. COMBI-hankkeen tulosten tavoitteena on antaa eri osapuolille tietoa ja työkaluja turvallisen, taloudellisen ja energiatehokkaan lopputuloksen saavuttamiseksi.

Alkusanat

Rakennusten hyvä energiatehokkuus on yksi tärkeä osa laadukasta rakentamista. Onnistunut energiatehokkuuden parantaminen auttaa pienentämään rakennusten elinkaarikustannuksia, tukee kansallista energiaomavaraisuutta ja pienentää rakennuskannan ympäristövaikutuksia. Energiatehokkuus ei kuitenkaan ole ainut rakennuksilta vaadittava ominaisuus, vaan rakennusten tulee olla esimerkiksi kauniita ja tilajärjestelyiltään toimivia, kosteusturvallisia, helppokäyttöisiä ja sisäilmaltaan laadukkaita. Energiatehokkuuden parantaminen tapahtuu siten useiden, keskenään ristiriitaistenkin tavoitteiden vallitessa.

COMBI-tutkimushankkeen valmistelu alkoi vuonna 2013, kun Suomen kansalliset uudisrakentamisen energiatehokkuusvaatimukset olivat juuri muuttuneet vuosina 2007, 2010 ja 2012. Näiden lisäksi käynnissä oli EU:n rakennusten energiatehokkuusdirektiivin mukaisten lähes nollaenergiarakennusten kansallisten tasojen määrittelytyö, joten odotettavissa oli energiatehokkuusmääräysten muuttuminen uudelleen viimeistään viiden vuoden kuluessa. Myös rakennusten korjaus- ja muutostöitä varten oli asetettu ensimmäistä kertaa omat energiatehokkuusvaatimuksensa vuonna 2013. Energiatehokkuusvaatimuksissa oli myös otettu käyttöön niin kutsutut energiamuotokertoimet, joiden yhtenä tavoitteena oli ohjata rakennuksissa käytettävän energian tuotantoa kohti uusiutuvia energialähteitä. Samaan aikaan rakennussektoriin kohdistui myös muita ilmiöitä, kuten olemassa olevan rakennuskannan suuri korjausvelka, osassa rakennuksia esiintyvät sisäilmaongelmat, tilojen muuntojoustovaatimukset, tietotekniikan huima kehitys ja erilaiset yhteiskunnalliset muutostekijät, kuten jo aikaisempina vuosikymmeninä alkanut väestön ikääntyminen sekä Suomen edelleen jatkuva kaupungistuminen. Aikaisempiin rakennusalan määräyksiin verrattuna nopeat muutokset energiatehokkuusvaatimuksissa korostivat tarvetta pystyä arvioimaan rakennusten energiatehokkuutta kokonaisuuden näkökulmasta ja ylipäättään määrittelemään, mitä kokonaisuuden hallinta on.

COMBI-tutkimushanke toteutettiin vuosina 2015–2018. Hankkeen tavoitteena oli selvittää keinoja parantaa julkisten palvelurakennusten, kuten koulujen, päiväkotien ja palvelutalojen energiatehokkuutta turvallisesti ja tehokkaasti. Hankkeen tutkimusosapuolina toimivat Tampereen teknilliseltä yliopistolta rakennusfysiikan, rakenteiden elinkaaritekniikan, energia- ja elinkaaritalouden, rakentamisen prosessien ja asuntosuunnittelun tutkimusryhmät; Tampereen ammattikorkeakoulusta talotekniikka-ryhmä sekä Aalto-yliopistosta energiatehokkuuden ja energiajärjestelmien tutkimusryhmä. Hankkeen koordinaattorina toimi rakennusfysiikan tutkimusryhmä Tampereen teknilliseltä yliopistolta. Hankkeen kokonaisbudjetti oli 2,4 miljoonaa euroa ja rahoittajina toimivat Business Finland (vuoteen 2017 asti Innovaatorahoituskeskus TEKES), Euroopan aluekehitysrahaston Innovatiiviset kaupungit -ohjelma (EAKR/INKA) sekä 37 rakennus- ja talotekniikka-alan yritystä (liite 1). Lisäksi mukana hankkeessa olivat Tampereen ja Helsingin kaupungit, Tampereen kaupunkiseutu sekä Nokian, Oriveden ja Ylöjärven kaupungit, Kangasalan, Lempäälän, Pirkkalan ja Vesilahden kunnat ja Ekokumppanit Oy.

COMBI-hankkeessa tuotettiin huomattavan suuri määrä erilaisia alkuperäisjulkaisuja, kuten diplomi- ja insinööritöitä, konferenssiartikkeleita, kansainvälisiä lehtiartikkeleita ja tutkimusraportteja (liite 2). Nämä julkaisut sisältävät yksityiskohtaisimmat kuvaukset tehdyistä tutkimuksista ja niistä saaduista tuloksista. Etsittäessä yksityiskohtaista tietoa hankkeen tuloksista on suosituksena tutustua näihin dokumentteihin.

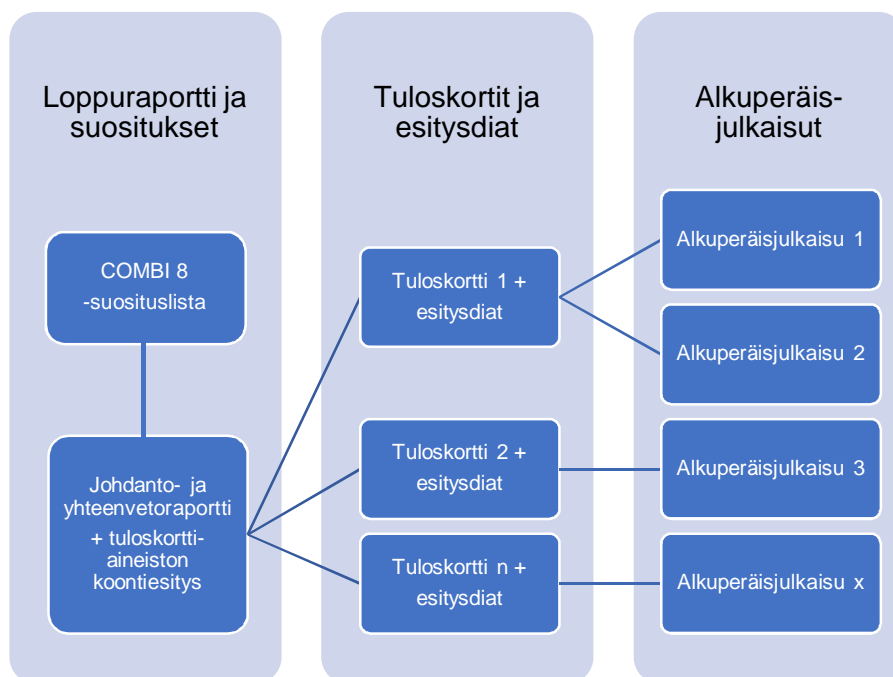
Jotta hankkeen tärkeimmät tutkimustulokset olisivat helpommin löydettävissä, on kustakin alkuperäisjulkaisuihin liittyvästä aihepiiristä laadittu myös lyhyt tuloskortti, jonka tehtävänä on kertoa kyseisen tuloskortin taustalla olevien COMBI-julkaisujen keskeisistä tuloksista ja toimia alustuksena

kyseisen tutkimusosion aihepiiriin. Kunkin tulokortin aihepiiristä on lisäksi laadittu noin 15–20 minuutin esitystä vastaavat esitysdiat. Nämä aineistot on tarkoitettu edistämään COMBI-hankkeen tulosten leviämistä tarjoamalla kaikille kiinnostuneille materiaaleja esimerkiksi koulutustapahtumia ja esittelytilaisuuksia varten.

Koska 45 tulokortin avulla voi olla haasteellista muodostaa laajasta hankkeesta yhtenäistä kokonaiskuvaa, on alkuperäisjulkaisujen ja tulokorttien lisäksi laadittu tämä koko tutkimushanketta käsittelevä johdanto- ja yhteenvetoraportti. Sen tarkoituksena on toimia johdantona koko hankkeen tuloksiin ja samalla laajentaa keskustelua kohti yleisempiä johtopäätöksiä ja suosituksia. Se sisältää myös hankkeen tutkimusosapuolten aikaisempaan työkokemukseen ja tutkimushankkeisiin perustuvia näkemyksellisiä kohtia, joista tutkimusosapuolilla on ollut hankkeen aikana yhteisymmärrys. Raportissa on pyritty antamaan ajatuksia myös muutamiin sellaisiin laajempiin kysymyksiin ja keskustelunaiheisiin, joita nousi esille hankkeen yhteydessä järjestetyissä työryhmäpalavereissa yritysedustajien sekä kaupunkien ja kuntien edustajien kanssa. Suurin paino on kuitenkin annettu varsinaisille COMBI-hankkeessa saaduille tuloksille ja niistä tehtävissä oleville johtopäätöksille. Johdanto- ja yhteenvetoraportin yhteyteen on koottu myös tulokortteja esittelevä diaesitys.

Johdanto- ja yhteenvetoraportissa esitetyjä suosituksia ja johtopäätöksiä on tiivistetty edelleen kahdeksan teemaa sisältäväksi **COMBI 8** suosituslistaksi, jota kutakin on havainnollistettu hankkeessa saatujen tulosten avulla. Suosituslista on esitetty tämän raportin liitteenä olevan tulokorttiaineiston alussa. Tiiviin esitystapansa vuoksi siihen tutustumista suositellaan kaikille COMBI-hankkeesta kiinnostuneille.

Eri tulosaineistojen jäsentämistapaa on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. COMBI-hankkeen tulosaineistojen jäsentäminen. Eri tutkimusosioiden yksityiskohtaisimmat tiedot löytyvät kuvan oikean reunan mukaisista alkuperäisjulkaisuista (liite 2.). Näiden perusteella tehdyt tulokortit toimivat esittelynä kuhunkin aihepiiriin ja ovat tämän raportin liitteenä (liite 3). Tämä johdanto- ja yhteenvetoraportti sekä COMBI-hankkeen suosituslista (liite 4) sisältävät laajimmat johtopäätökset ja suositukset.

COMBI-hankkeen alkuperäisjulkaisuissa, tulokorteissa, johdanto- ja yhteenvetoraportissa sekä esitysdioidissa on esitetty tutkimustuloksia ja suosituksia, joista katsotaan olevan laajasti hyötyä rakennusten energiatehokkuuden ja toimivuuden parantamiseen. Näiden aineistojen hyödyntäminen ja soveltaminen tulee kuitenkin aina tehdä tapauskohtaista harkintaa käyttäen ja kyseisen kohteen erityispiirteet huomioon ottaen.

Hankkeen kuluessa järjestettiin huomattava määrä erilaisia tilaisuuksia ja tapahtumia normaalin tutkimustyön lisäksi. Näitä olivat julkiset yleisöseminaarit (4 kpl), hankkeen kaikille osapuolille tarkoitetut työryhmäpalaverit ja työpajat (37 kpl), ohjausryhmän kokoukset (12 kpl) ja tutkijapalaverit (12 kpl). Hankkeen puitteissa järjestettiin myös vuonna 2015 kotimaan ekskursio Ouluun ja vuonna 2016 ulkomaan ekskursio, jonka yhteydessä vierailtiin Trondheimissa, Osllossa ja Amsterdamissa. Työryhmäpalaverien avulla jaettiin tietoa hankkeen etenemisestä ja tuloksista kaikille osapuolille ja toisaalta kerättiin arvokkaita kokemuksia ja palautetta yritysten, kaupunkien ja kuntien edustajilta.

Tämän raportin kirjoittamiseen ovat osallistuneet useat eri henkilöt. Eri lukujen kirjoittajat ovat:

Alkusanat ja luku 1:	Anssi Laukkarinen
Luku 2:	Juhani Heljo, Olli Teriö, Ulrika Uotila ja Pirkko Pihlajamaa
Luku 3:	Tapio Kaasalainen ja Taru Lehtinen
Luku 4:	Anssi Laukkarinen, Pauli Sekki ja Juha Vinha
Luku 5:	Juha Jokisalo, Jukka Paatero, Pirkko Pihlajamaa, Pirkko Harsia, Kari Kallioharju, Sakari Uusitalo ja Anssi Laukkarinen
Luku 6:	Anssi Laukkarinen ja Eero Tuominen

Alkuperäisjulkaisujen kirjoittajat on kerrottu lähdeviittausten yhteydessä liitteessä 2. Kunkin tuloskortin pääasiallinen kirjoittaja on kerrottu kyseisessä tuloskortissa. Tämän johdanto- ja yhteenvetoraportin luonnosversioon saatiin kommentteja useilta eri henkilöiltä ja sen sisältöä on kehitetty niiden avulla. Raportin on toimittanut Anssi Laukkarinen.

Hankkeella on ollut osaavista jäsenistä koostuva ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet:

<i>Sasu Karkiainen (Ohjausryhmän puheenjohtaja)</i>	AX-Suunnittelu Oy
<i>Petteri Neva</i>	Arkkitehtitoimisto Neva
<i>Tero Wéman</i>	Arkkitehtipalvelu Oy Jyväskylä
<i>Jouni Eronen (Asso Erävuoma 26.9.2016 asti)</i>	Finnfoam Oy
<i>Jussi Harjula (Mikko Kivinen 7.10.2015 asti)</i>	Skanska Oy
<i>Timo Laapio</i>	Peab Oy
<i>Timo Turunen (Inari Weiho 19.1.2016 asti)</i>	Ramboll Finland Oy
<i>Kari Koivumäki</i>	Nokian Talotekniikka Oy
<i>Jyri Renkola</i>	Sweco Talotekniikka
<i>Sini Tuomisto (Antti Paulanne 19.1.2016 asti)</i>	Schneider Electric Finland Oy
<i>Virpi Ekholm</i>	Tampereen Tilakeskus Liikelaitos
<i>Jussi Kuoppala (Pertti Koivisto 18.5.2017 asti)</i>	Tampereen Tilakeskus Liikelaitos
<i>Ritva Asula-Myllynen</i>	Tampereen kaupunkiseutu
<i>Ulla Siuko</i>	Ylöjärven kaupunki
<i>Kirsi Torikka-Jalkanen (Sari Hildén 19.5.2016 asti)</i>	Helsingin kaupunki
<i>Jouko Salo (Ilmari Absetz 30.8.2018 asti)</i>	Business Finland

Risto Kosonen (Kai Sirén 19.4.2018 asti)

Aalto yliopisto

Juha Jokisalo

Aalto yliopisto

Pirkko Harsia

Tampereen ammattikorkeakoulu

Pirkko Pihlajamaa (Olli Teriö, TTY, 19.4.2018 asti)

Tampereen ammattikorkeakoulu

Tapio Kaasalainen

Tampereen teknillinen yliopisto

Anssi Laukkarinen (hankkeen projektipäällikkö)

Tampereen teknillinen yliopisto

Juha Vinha (hankkeen vastuullinen johtaja)

Tampereen teknillinen yliopisto

COMBI-hankkeen tutkimusosapuolet haluavat kiittää hankkeen rahoittajia, ohjausryhmän jäseniä, kaupunkien ja kuntien edustajia sekä kaikkia case-kohteiden yhteyshenkilöitä, jotka ovat olleet mukana edistämässä laajan ja mielenkiintoisen hankkeen toteutusta.

Tampereella 24.1.2019,

Tekijät

Sisällys

Tiivistelmä.....	i
Alkusanat	iii
1 Johdanto.....	1
1.1 Mitä energiatehokkuus on ja miten sitä parannetaan?.....	1
1.2 Energiatehokkuuden rinnalla vaikuttavista ilmiöistä	2
1.2.1 Sisäiset ja ulkoiset tekijät.....	2
1.2.2 Olemassa olevan rakennuskannan sisäilmaongelmat	3
1.2.3 Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen.....	4
1.2.4 Oman uusiutuvan energian tuotannon hyödyntäminen	4
1.2.5 Lämpö- ja sähkötehon hallinta.....	5
1.2.6 Kustannusoptimalisuus	6
1.2.7 Laskettujen ja toteutuneiden arvojen väliset erot	6
1.2.8 Ilmastomuutos	7
1.2.9 Yhteiskunnalliset muutokset ja yleinen teknologian kehittyminen	7
1.3 Eri suunnittelualojen tärkeys ja rooli	8
1.4 Tulosten jalkauttaminen	9
1.5 Lähteet	10
2 Energiatehokkaan rakennuksen hankeprosessi ja käyttövaihe.....	11
2.1 Hankeprosessi	11
2.1.1 Havaittuja haasteita	11
2.1.2 Suosituksia hankeprosessin vaiheisiin.....	12
2.1.3 Sisäilmakorjausten hankeprosessi	15
2.1.4 Yhteenveto	16
2.2 Rakennuksen toimivuuden varmistaminen käyttövaiheessa.....	17
2.2.1 Lähtökohta	17
2.2.2 Tavoitteiden tunteminen ja niiden saavuttamisen seuraaminen	17
2.2.3 Resurssien riittävyys.....	18
3 Arkkitehtuuri ja tilat	19
3.1 Nykyiset suunnitteluratkaisut palveluasumisessa ja peruskouluissa.....	19
3.2 Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun arviointikeinot.....	20
3.3 Energiatehokkuuden kannalta keskeisimmät arkkitehtisuunnittelun ratkaisut	20
3.3.1 Käyttöä tukeva tilojen ja tekniikan suunnittelu.....	20
3.3.2 Ikkunasuunnittelu ja aurinkosuojaus	21
3.4 Arkkitehtoninen laatu energiatehokkaassa suunnittelussa.....	22
4 Rakenteet	23
4.1 Rakennusten kosteusvauriot	23
4.2 Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet.....	24
4.3 Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta	25
4.3.1 Lämmöneristetyypin vaikutus betonisten sisäkuorielementtien kuivumiseen	25
4.3.2 Maanvastaiset seinät.....	27
4.3.3 Puhalluseristetyt yläpohjat.....	28

4.3.4	Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen	29
5	Talotekniikka ja teknisten ratkaisujen kustannustehokkuus	31
5.1	Rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien kustannusoptimalisuus	31
5.2	Uusiutuvan energian etätuotanto	32
5.2.1	Sähkön ja lämmön etätuotantoon liittyvä lainsäädäntö	32
5.2.2	Uusiutuvan energian etätuotannon taloudellinen kannattavuus	32
5.3	Valaistuksen energiatehokkuus	33
5.4	Rakennusautomaatiojärjestelmät	33
6	Sisäilman olosuhteet ja toteutunut energiankulutus	35
6.1	Sisäilman olosuhteet	35
6.1.1	Yleistä	35
6.1.2	Sisäilman lämpötila	35
6.1.3	Kosteuslisä ulkoilmaan nähden	36
6.1.4	Hiilidioksidipitoisuus	36
6.1.5	Paine-ero ulkovaipan yli	37
6.1.6	Sisäilman radonpitoisuus	40
6.2	Rakennusten energiankulutus	40
6.2.1	Koulujen ja päiväkotien toteutunut energiankulutus	41
6.2.2	Määräystenmukaisuuden osoittaminen ja vertailu toteutuneeseen energiankulutukseen ...	42
6.2.3	Toteutuvan energiankulutuksen ennakointi	43
Liitteet	45
	Liite 1: Rahoittajat sekä kaupunki- ja kuntayhteistyökumppanit, 2 s.	
	Liite 2: Julkaisuluettelo sekä tulokortti- ja taustajulkaisutaulukko, 13 s.	
	Liite 3: Tulokortit, 90 s.	
	Liite 4: COMBI 8 -suositukset, 6 s.	

1 Johdanto

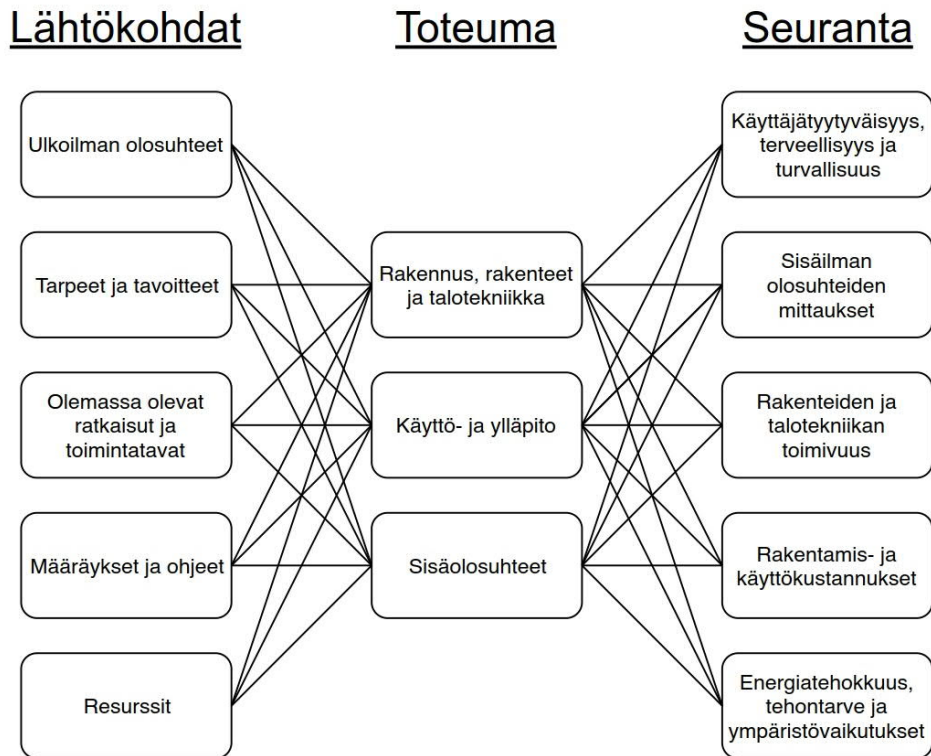
1.1 Mitä energiatehokkuus on ja miten sitä parannetaan?

Rakennusten energiatehokkuudella tarkoitetaan rakennuksissa käytetyn energian määrää suhteutettuna rakennusten laajuuteen tai käyttöön. Energiatehokkuuden parantamiselle on olemassa useita perusteluja, kuten yksittäisen rakennuksen elinkaarikustannusten minimointi, kansallisen energiaomavaraisuuden edistäminen ja uusien liiketoimintamahdollisuuksien luominen sekä rakentamisesta ja asumisesta syntyvien ympäristövaikutusten pienentäminen. Koska osa näistä tavoitteista on koko yhteiskuntaa koskevia yksittäisten rakennushankkeiden sijaan, on myös valtiovallan perusteltua asettaa rakennushankkeille erilaisia vaatimuksia näiden laajempien tavoitteiden edistämiseksi. Energiatehokkuutta parantavien muutosten halutaan usein myös parantavan rakennusten sisäilman olosuhteita ja järjestelmien toimivuutta pitkällä aikavälillä. Entistä enemmän energiatehokkuudessa on alkanut korostumaan myös tehon käytön ja erityisesti sähkötehon käytön ajoittuminen.

Energiatehokkuuden parantamista ei kuitenkaan voida tehdä suoraan, vaan aina jonkin muun järjestelmän tai toimintatavan kautta. Lisäksi rakennusten toteutuva energiankulutus muodostuu usean eri tekijän yhteisvaikutuksesta, eikä useinkaan ole olemassa yhtä yksittäistä tekijää, jonka muuttaminen parantaisi rakennusten energiatehokkuutta laajasti ja kaikissa tilanteissa. Tällöin esimerkiksi vaipan ilmatiiviyden parantaminen, ilmanvaihdon ilmavirtojen säätäminen, taloteknisten järjestelmien uusiminen ja tilojen käytön tehostaminen vaikuttavat energiatehokkuuden lisäksi myös muihin tekijöihin, kuten rakenteiden kosteusturvallisuuteen, sisäilman olosuhteisiin sekä investointien suuruuteen ja kannattavuuteen. Yhdessä nämä eri tekijät muodostavat laajan verkoston, jossa yksittäisillä muutoksilla on tyypillisesti useita erilaisia vaikutuksia. Jotta energiatehokkuuden parantaminen tapahtuisi kestäväällä ja tehokkaalla tavalla, on tärkeää arvioida eri energiatehokkuustoimenpiteitä kaikista keskeisistä eri näkökulmista ennen lopullisten toimenpiteiden valintaa ja toteutusta.

Rakennusten toteutunut energiankulutus ja energiatehokkuus voidaan myös määritellä useilla eri tavoilla, mikä johtaa eri tilanteissa erilaisiin painotuksiin. Esimerkiksi rakennusten energiatehokkuuden mittaaminen joko lattiapinta-alaa tai käytön määrää kohti johtaa erilaisiin suosituksiin siitä, millä toimenpiteillä energiatehokkuutta tulisi parantaa. Tärkeä taloudellinen tavoite varsinkin palvelurakennuksissa on käyttöasteen nostaminen, mikä kuitenkin lisää energian kulutusta rakennustasolla. Energiatehokkuutta arvioitaessa tarvitaankin useita mittareita, jotta saadaan oikeanlainen kokonaiskuva energiatehokkuudesta. Energiatehokkuuden määrittelytavan lisäksi myös toimenpidevaihtoehtoja on olemassa useita, jotka eivät kuitenkaan ole keskenään aina yhtä helppoja toteuttaa, turvallisia tai kustannustehokkaita. Kaikilla eri toimenpidevaihtoehtojilla on toisaalta omat vahvuusalueensa, josta syystä projektien alussa tulisi pystyä arvioimaan ja vertailemaan eri vaihtoehtoja avoimesti ja riippumattomasti.

Rakennusten energiatehokkuuteen liittyvien taustatekijöiden, toteutuneen tilanteen ja sen seurannan yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Yksittäiseltä rakennukselta vaaditaan useita ominaisuuksia, joista hyvä energiatehokkuus muodostuu useiden tekijöiden yhteisvaikutuksena ja on tavoitteena vain yksi muiden joukossa.

Oleellista on myös seurata ja mitata, miten hyvin on onnistuttu.

Rakennuskannan energiatehokkuuden parantaminen muodostaa monimutkaisen kokonaisuuden, jonka hallinta vaatii useiden vaatimusten yhtäaikaista täyttymistä, alakohtaista erityistietämystä, sekä toimivat yhteistyön organisoimistavat. Tavoiteltaessa laajaa muutosta sekä uudis- että korjausrakentamisessa, joudutaan totuttuja rakentamistapoja muuttamaan tai jopa kokonaan korvaamaan uusilla. Tällaisessa tilanteessa ei ole itsestään selvää, miten energiatehokkuuteen liittyvät toimenpiteet tulisi valita, jotta asetetut tavoitteet saavutettaisiin tehokkaasti ja ilman negatiivisia seurannaisvaikutuksia.

1.2 Energiatehokkuuden rinnalla vaikuttavista ilmiöistä

1.2.1 Sisäiset ja ulkoiset tekijät

Osa rakennusten todelliseen energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä ovat sellaisia, joihin rakennusten suunnittelijat, rakentajat, käyttäjät ja ylläpitohenkilökunta pystyvät suoraan vaikuttamaan (sisäiset tekijät). Näitä ovat esimerkiksi yksittäisten rakennusten arkkitehtuuri ja tilajärjestelyt, vaipparakenteiden lämmöneristystaso ja ilmatiiviyys, taloteknisten järjestelmien tyyppi ja toimivuus, ilmanvaihdon sekä lämmityksen ja jäähdytyksen säätöarvot sekä rakennuksen kunnon seuranta ja esiintyvien puutteiden korjaaminen. Uudisrakentamisessa voidaan nähdä olevan enemmän mahdollisuuksia ottaa käyttöön aikaisempaa energiatehokkaampia ratkaisuja korjausrakentamiseen verrattuna, mutta toisaalta myös vaatimustaso on uudisrakentamisessa usein korkeampi, rajoittaen käytettävissä olevia mahdollisuuksia.

Rakennusten energiankulutukseen ja siitä aiheutuviin päästöihin liittyy myös useita hankkeen ulkopuolisia tekijöitä, joita ei yksittäisten rakennushankkeiden puitteissa voida kontrolloida. Tällaisia hankkeen ulkopuolisia tekijöitä ovat esimerkiksi vallitsevat ilmasto-olosuhteet, muu rakennettu

ympäristö, kaavoituksen ja rakentamismääräysten asettamat ehdot, yhteiskunnan energiantuotannon ominaisuudet sekä yhteiskunnalliset muutokset, kuten kaupungistuminen, väestön ikääntyminen, tilojen muuntojoustovaatimukset ja tietotekniikan kehittyminen. Pienempiä yksityiskohtia lukuun ottamatta muutokset tällaisissa asioissa tapahtuvat yksittäistä hanketta laajemmilla alueilla ja pidemmällä aikavälillä. Näiden asioiden huomioon ottaminen ja niihin sopeutuminen ovat kuitenkin tärkeässä roolissa rakennuksia suunniteltaessa ja myöhemmin elinkaaren aikana.

Julkisten palvelurakennusten hankeprosessiin liittyy vahvasti julkisia hankintoja koskeva hankintalainsäädäntö ja niihin liittyvä sopimustekniikka. Kyseinen aihe on vaativa ja hankintalainsäädännön vaatimusten täyttäminen suhteessa toimivien ja laadukkaiden rakennusten hankkimiseen nousikin esille kunta- ja kaupunkiedustajien osalta. Työ- ja elinkeinoministeriön ohje: ”Energiatehokkuus julkisissa hankinnoissa (2016)” suosittelee laajan ja avoimen markkinakartoituksen tekemistä ennen hankinnan virallisen osuuden käynnistämistä, kuten tarjouspyynnön ja sopimusehtojen laatimista. COMBI-hankkeen yhtenä tavoitteena on ollut antaa ohjeita hyvän hankeprosessin ja siihen liittyvien ratkaisujen määrittämiseen, helpottaen siten myös hankintojen määrittämistä ja kilpailuttamista.

Seuraavissa luvuissa on esitelty tärkeimpiä rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyviä tekijöitä, aloittaen sisäisistä ja siirtyen kohti ulkoisia.

1.2.2 Olemassa olevan rakennuskannan sisäilmaongelmat

Erilaiset rakennusten sisäilman laatuun kohdistuvat puutteet muodostavat yhteiskunnallisesti merkittävän haasteen. Sisäilmaongelmien määrästä ja vaikutuksista laaditut arviot vaihtelevat, mutta yleisesti ottaen sisäilmaongelmat koskevat suurta määrää ihmisiä ja aiheuttavat esiintyessään huomattavan paljon huolta, työtä ja kustannuksia. Asian tiimoilta ministeriöt ovat esimerkiksi käynnistäneet useita laajoja ohjelmia, joista viimeisimpiä ovat Kosteus- ja hometalkoot sekä Terveet tilat 2028. Asian yksiselitteistä ratkaisemista hankaloittaa kuitenkin aihepiiriin laajuus ja se, että yksittäisissä kohteissa tehtävät toimenpiteet pitää lopulta aina räätälöidä tapauskohtaisia vaatimuksia vastaaviksi.

Sisäilma ja sisäolosuhteet voivat kärsiä esimerkiksi liian korkeasta tai matalasta lämpötilasta, liiasta kuivuudesta, melusta tai visuaalisista häiritteistä; rakennusmateriaalien sisäilmaan luovuttamista kemiallisista yhdisteistä, kuiduista tai pölystä; tai rakennuksen ulkopuolelta tulleista aineista tai rakenteisiin tai ilmanvaihtojärjestelmään muodostuneista epäpuhtauksista, kuten siitepöly, radon tai mikrobiperäiset epäpuhtaudet. Yksittäisen rakennuksen korjaustarpeen ennakointi ja sisäilmaongelmaisen rakennuksen korjaaminen edellyttävät yhden tai useamman taustalla vaikuttavan juurisyyn tunnistamista ja sen korjaamista. Riskien hallinnan näkökulmasta katsottuna ensisijainen vaihtoehto on pyrkiä poistamaan kyseinen riski tai häiritteijä kokonaan ja jos tämä ei ole mahdollista, vasta tämän jälkeen harkita sen vaikutusten pienentämistä ja muita vaihtoehtoja. Energiatehokkuuden parantamisesta saatavat säästöt hukataan, jos energiatehokkuuden nimissä tehtävien toimenpiteiden seurauksena joudutaan myöhemmin korjaamaan puutteelliseksi osoittautuvia ratkaisuja. Muun muassa ilmanvaihtoratkaisut ja niiden tarkoituksenmukainen sekä ammattitaitoinen käyttö ja huolto ovat tällöin keskeisessä roolissa.

COMBI-hankkeen yksi keskeinen taustalla oleva ajatus on, että toimivien ratkaisujen ja käytäntöjen seurauksena arkkitehtuuria, rakenteita tai talotekniikkaa koskevat häiritteijät saataisiin suurelta osin vältettyä, jolloin myöskään niistä seuraavia ongelmia ei pääsisi syntymään. Tästä seurauksena

esimerkiksi erilaisten mikrobilajikkeiden tai muiden haitta-aineiden kulkeutuminen tai niistä käyttäjiin kohdistuvien vaikutusten tutkiminen on rajattu hankkeen tutkimuskysymysten ulkopuolelle.

1.2.3 Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen

Energian tuotantoon liittyvä laaja muutos on siirtyminen kohti uusiutuvia ja vähäpäästöisiä energialähteitä, joka kattaa sekä energiayhtiöiden tekemät muutokset lämpöä ja sähköä tuottaviin laitoksiin että energian omatuotannon toteuttamisen uusiutuvilla energialähteillä.

Kaukolämpöverkkojen alueella julkiset palvelurakennukset ovat tyypillisesti liittyneet tähän verkkoon. Sähköenergia puolestaan on hankittu kilpailuilta markkinoilta ja se on toimitettu kohteeseen paikallisen siirtoverkkoyhtiön kautta. Kaukolämpö- ja sähkön siirtoverkon kautta saatava energia käsitellään tällä hetkellä rakentamisen energiamääräyksissä ja energiatodistuksissa aina vakiosuuruisilla energiamuotokertoimilla riippumatta siitä, millä tavoin kyseinen lämpö- ja sähköenergia on tuotettu ja mitkä ovat sen ominaispäästöt. Useat energiayhtiöt ovat uusineet viime vuosina omia tuotantolaitoksiaan tehokkaammiksi ja siirtyneet käyttämään aikaisempaa enemmän uusiutuvia energialähteitä. Jos rakennukseen ostettavan energian energiamuotokertoimet (painoarvot) riippuisivat nykyistä selkeämmin tuotetun energian ominaispäästöistä, kiihdyttäisi tämä todennäköisesti paikallisesti siirtymistä kohti vähäpäästöisempiä energiamuotoja. Tätä aihepiiriä ei kuitenkaan ole tarkasteltu COMBI-hankkeessa.

Tekniikan kehittyessä lämmön ja sähkön omatuotanto muodostaa kasvavan vaihtoehdon tontin ulkopuolelta ostettavalle energialle. Omatuotanto on käytännössä yksinomaan uusiutuvilla energialähteillä, kuten aurinkopaneeleilla ja -keräimillä sekä biopolttoaineilla tuotettua. Uusiutuvan energian omalla tuotannolla voidaan tavoitella esimerkiksi nykyistä laajempia mahdollisuuksia tehdä kustannusoptimointia eri energiansäästötoimenpiteiden kesken, uusiutuvan energian osuuden kasvattamista kaikesta energiantuotannosta ja uusien liiketoimintamahdollisuuksien luomista.

Kaukolämmön ja sähkön ostaminen ulkopuolisilta kaukolämpö- ja sähköyhtiöiltä on tarkoittanut samalla ammattimaisesti hoidettua palvelua, minkä lisäksi energian hinta on ollut verrattain alhainen ja huoltovarmuus hyvä moniin muihin maihin verrattuna. Omatuotanto puolestaan edellyttää omaa suunnittelua, investointeja sekä järjestelmien aktiivista seurantaa ja ylläpitoa. Jos itselle hankittavien tuotantolaitteiden investointikustannukset ovat tarpeeksi alhaiset, käyttö riittävän helppoa ja toimintavarmuus hyvä, niin tämä kiristää kilpailua kaukolämpö- ja -jäähdytys- sekä sähköverkoista ostetun energian ja oman tuotannon välillä. Tämä kehitys on suurelta osin energiatehokkuusmääräyksistä riippumatonta, mutta oman tuotannon hyödyntämiseen liittyy tällä hetkellä myös erinäisiä rajoituksia, joita purkamalla yhteiskunnan olisi mahdollista vauhdittaa uusiutuvien energialähteiden käyttöönottoa.

1.2.4 Oman uusiutuvan energian tuotannon hyödyntäminen

Kaava- ja rakentamismääräysten puitteissa rakennuksiin on mahdollista kytkeä lämpö- ja sähköenergiaa tuottavia laitteita, kuten aurinkopaneeleita tai aurinkokeräimiä. Näiden tuottama lämpö- ja sähköenergia voidaan hyödyntää kyseisessä rakennuksessa tapahtuvan kulutuksen kattamiseen, mutta rakennusten energiatehokkuutta ja kustannusoptimaalisuutta koskien aiheeseen liittyy myös muita asiakokonaisuuksia.

Rakennusten määräystenmukaisuuden osoittamisessa rakennuksille on annettu käyttötarkoituksiluokittain laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun (E-luvun) yläraja-arvot, joihin pääsemiseksi voidaan yksittäisissä kohteissa käyttää eri menetelmiä. Tällöin uusiutuvan energian oman tuotannon

hyödyntämiseen liittyvä ensimmäinen kysymys on, että missä tilanteissa ja minkä mittaisilla ajanjaksoilla tarkasteltuna omaa lämmön ja sähkön tuotantoa voidaan käyttää tämän vaatimuksen täyttymisen osoittamisessa?

Toinen kysymys koskee oman uusiutuvan energiantuotannon kustannusoptimaalisuutta, kun tuotantolaitteet on kytketty rakennukseen joko omalla yhteydellä tai sitten yleisen siirtoverkon kautta. Siirtoverkon käyttö edellyttää tällä hetkellä siirtomaksujen ja verojen maksamista, jotka vaikuttavat oman tuotannon kannattavuuteen.

Kolmas aihepiiri koskee omilla tuotantolaitteilla tuotetun lämpö- tai sähköenergian myymistä takaisin verkkoon päin, esimerkiksi aurinkosähkön ylijäämän myymistä energiayhtiölle. Lämpö- ja sähköenergian myynti takaisin verkkoon päin ja sen taloudellinen kannattavuus riippuvat olemassa olevasta lainsäädännöstä ja ostajan energialle myöntämästä hinnasta.

Etätuotannon mahdollisuuksia lisäävät tavoitteet uusiutuvan sähkön ja lämmön käytön lisäämisestä ja etätuotannon toteuttamisen helpottuminen tekniikan kehittyessä. Toisaalta haasteita etätuotannolle ovat muun muassa epäselvyydet lainsäädännöllisessä asemassa ja verotuksessa, uuden tekniikan käyttöönoton haasteet, lähestymistavan painotus muualle kuin rakennuksiin itseensä ja rakennusten ylläpitohenkilökunnalle muodostuvat uudet osaamistarpeet. COMBI-hankkeen osana on tarkasteltu paikallisen aurinko- ja tuulisähkön tuotannon käytäntöjä ja säädöksiä sekä vertailtu paikallisen tuotannon ja etäämpänä keskitetysti tuotetun oman tuotannon mielekkyyttä loppukäyttäjän ja energijärjestelmän näkökulmasta. Hankkeessa ei käsitelty vesi- tai bioenergiaan pohjautuvia ratkaisuja.

1.2.5 Lämpö- ja sähkötehon hallinta

Kaikkiin rakennuksen lämpö- ja sähköenergiaa kuluttaviin ja tuottaviin järjestelmiin liittyy myös tehon käsite, joka kuvaa energian siirtymisen nopeutta. Jos energiaa on tarpeen siirtää tai tuottaa hyvin nopeasti, asettaa se kyseisille järjestelmille suuremmat vaatimukset, kuin että energiaa riittäisi siirtää hitaammin.

Rakennuksen lämpö- ja sähkötehon tarve muuttuu jatkuvasti vuoden- ja vuorokaudenajan sekä käytön mukaan. Tämä katetaan tuotantokapasiteetilla, jossa myös esiintyy oma normaali vaihtelunsa. Lämpö- ja sähkötehon tarpeen ja tarjonnan tasapainottaminen on aikaisemmin tehty ja tehdään vielä tälläkin hetkellä pääosin tuotantoa muuttamalla. Tehon tarkastelu on tärkeässä roolissa erityisesti sähkönkulutuksen ja -tuotannon puolella, koska järjestelmän säätäminen tulee tehdä huomattavasti lyhyemmällä aikaresoluutiolla lämpötehoon verrattuna.

Vuonna 2009 voimaan tulleen lainsäädännön mukaiset digitaaliset etäluettavat sähkömittarit ja tuntipohjainen sähkönkulutuksen mittaus on mahdollistanut uusien sopimustyyppien ja palveluiden käyttöönoton, mutta niin sanotun kysyntäjoustop toteuttaminen olemassa olevissa rakennuksissa on vielä melko vähäistä. Siirryttäessä enemmän kohti sääriippuvaa energiantuotantoa, kuten tuuli- ja aurinkoenergiaa, kasvaa käytettävissä olevan tehokapasiteetin vaihtelu ja siten myös kysyntäjoustop tarve.

Keskeinen tehoon liittyvä suure on myös huipputehontarve, jonka suuruus vaikuttaa rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoitukseen, kiinteistön verkon mitoitukseen ja liittämäsopimukseen, jakeluverkon mitoitukseen ja energiantuotantojärjestelmässä varalla pidettävään tehoreserviin. Sähkötehon mitoituksella on siis monia vaikutuksia sekä yksittäisen rakennuksen, että sähköjärjestelmän näkökulmasta katsottuna.

Taloteknisten järjestelmien mitoitustehon pienentäminen mahdollistaisi pienempien ja edullisempien taloteknisten järjestelmien käyttämisen ja toisaalta vähentäisi pitkällä aikavälillä suuripäästöisten energiantuotantomuotojen käyttämistä huipputehontarpeen aikana. Kustannusoptimaaliset järjestelmävalinnat riippuvat kuitenkin olemassa olevasta lainsäädännöstä, markkinoilla olevista laitteistoista ja muista kohdekohtaisista lähtötiedoista.

1.2.6 Kustannusoptimaalisuus

Kustannusoptimaalisuudella tarkoitetaan asetettujen tavoitteiden saavuttamista pienimmällä mahdollisella rahamäärällä. Kustannusoptimaalisella tasolla tarkoitetaan sitä energiatehokkuuden arvoa ($\text{kWh}/(\text{m}^2, \text{vuosi})$), jolla laskentajakson pienin saavutettavissa oleva elinkaarikustannus saavutetaan. Kustannusoptimaalisella tasolla tarkoitetaan joskus myös sitä energiatehokkuustoimenpiteiden joukkoa, joka vastaa kyseistä energiatehokkuuden arvoa.

Kustannusoptimaalisuustarkastelut ovat tärkeitä, koska ne auttavat vertailemaan suurta määrää eri energiatehokkuustoimenpiteitä ja tuovat siten lisää informaatiota päätöksenteon avuksi. Energiatehokkuusmäärysten näkökulmasta katsottuna kustannusoptimointia tarvitaan jo siitäkin syystä, että eurooppalainen rakennusten energiatehokkuusdirektiivi edellyttää kutakin jäsenvaltiota määrittämään omat kustannusoptimaaliset tasonsa ja päivittämään omat uudisrakentamisen vaatimuksensa tämän mukaiseksi viimeistään viiden vuoden välein. Vaikka kustannusoptimointia on mahdollista tehdä useiden eri vaatimusten vaikuttaessa samanaikaisesti (monitavoiteoptimointi), voi osa päätöksentekoon vaikuttavista asioista olla vaikeasti muunnettavissa numeeriseen muotoon. Tällöin esimerkiksi rakennusten arkkitehtonisen laadun arvostus tai omien vastuiden kasvattamisen merkitys tulee käsitellä tarvittavassa laajuudessa kustannusoptimoinnin tulosten rinnalla.

COMBI-hankkeen osana on määritetty yhteiset lähtötiedot kustannusoptimaalisuuslaskentaa varten ja lisäksi kehitetty ja hyödynnetty eri menetelmiä kustannusoptimointia (taloudellisuuslaskentaa) varten. Pohja-ajatuksena on ollut, että eri tilanteissa on järkevää hyödyntää erilaisia menetelmiä, riippuen projektin laajuudesta ja käytettävissä olevista lähtötiedoista. Tulosten yhteismitallistamiseksi ja suoran, kustannuksiin perustuvan arvioinnin helpottamiseksi, COMBI-hankkeessa kustannusoptimaalisia tasoja ja niihin liittyviä toimenpiteitä on tarkasteltu ensisijaisesti ostoenergiankulutuksen (laskujen perusteena olevan energian määrän) näkökulmasta ja vasta tämän jälkeen toissijaisesti E-luvun näkökulmasta. Kustannuksiin liittyviä sosiaalisia ulottuvuuksia ei ole hankkeessa tarkasteltu, esimerkiksi investointikustannusten kasvattamisen vaikutuksia elinkaarikustannusten näkökulmasta optimaalisten vaihtoehtojen saavutettavuuteen.

1.2.7 Laskettujen ja toteutuneiden arvojen väliset erot

Rakennusten ja sen järjestelmien suunnittelu perustuu aina jonkinlaisiin malleihin siitä, miten asiat toimivat, olivat kyseessä sitten käsitteelliset tai matemaattiset mallit. Malli ei koskaan voi kuvata alkuperäisen järjestelmän käyttäytymistä täydellisesti, mutta hyvässä tapauksessa mallin antamat tulokset kuvaavat riittäväällä tarkkuudella suunnittelun kohteena olevan järjestelmän käyttäytymistä niin, että sen avulla pystytään tekemään perusteltuja valintoja eri toimenpiteistä.

Esimerkiksi rakennuksen energiankulutusta on mahdollista arvioida käyttäen joko lämpöhäviöiden tasauslaskennan mukaista ominaislämpöhäviötä ja vuosittaisia lämmitystarvelukuja, kuukausitason energialaskentaa tai dynaamisia simulointeja. Yksityiskohtaisemmat menetelmät mahdollistavat ilmiöiden tarkemman kuvaamisen, mutta toisaalta edellyttävät suurempaa määrää erilaisia lähtötietoja ja huolellisempaa tulosten arviointia. Puutteet laskennan lähtötiedoissa tai laskentamenetelmissä

aiheuttavat eroja laskettujen ja toteutuneiden arvojen (esimerkiksi energiankulutuksen) välille, mikä taas voi aiheuttaa puutteellisia valintoja kustannusoptimaalisuuden tai teknisen toimivuuden näkökulmasta.

1.2.8 Ilmastonmuutos

Ennustettu ilmastonmuutos aiheuttaa erilaisia muutoksia rakennuksiin ympäröiviin olosuhteisiin, kuten nostaa ulkoilman lämpötilan vuosikeskiarvoa, lisää pilvisyyttä, vähentää suoran auringonsäteilyn määrää ja lisää vesisateen määrää. Nämä tekijät muun muassa vähentävät rakennusten lämmitystarvetta, kasvattavat jäähdytystarvetta ja kasvattavat vaipparakenteisiin kohdistuvia rakennusfysikaalisia kuormituksia. Ottamalla ilmastonmuutoksen vaikutukset etukäteen huomioon, pystytään välttämään energiansäästötoimenpiteillä tavoiteltavien hyötyjen kulumisen sisäolosuhteiden heikkenemiseen tai jäähdytysenergiankulutuksen kasvuun sekä vaipparakenteiden käyttöiän lyheneminen.

Ilmastonmuutoksen hillitsemisessä on tärkeää muistaa, että rakennusten energiatehokkuuden parantaminen ei yksinään vielä ole kattava toimenpide kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseksi. Samaan aikaan on huolehdittava energiantuotannon ominaispäästöjen pienentämisestä sekä rakennuksen kaikkien elinkaaren vaiheiden vähäpäästöisyydestä.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä rakennusten sisäilman olosuhteisiin ja energiankulutukseen on tarkasteltu muun muassa aikaisemmassa FRAME-hankkeessa asuinrakennusten osalta. COMBI-hankkeessa simulointitarkasteluja on tehty julkisten palvelurakennusten osalta ja tehdyissä tarkasteluissa on hyödynnetty myös dataa ennakoituista tulevaisuuden ilmasto-olosuhteista.

1.2.9 Yhteiskunnalliset muutokset ja yleinen teknologian kehittyminen

Energiantuotantoon ja -kulutukseen liittyvien valintojen ja muutosten lisäksi julkisiin palvelurakennuksiin kohdistuu myös muita muutospaineita: Isojen kaupunkien väkimäärä kasvaa, jolloin myös esimerkiksi koulu- ja päiväkotipaikkojen tarve kasvaa. Vastaavasti taas osassa Suomen kunnista asukasmäärä pienenee, jolloin aikaisemmin käytössä olleet palvelurakennukset ovat voineet jäädä vähemmälle käytölle. Koulujen ja päiväkotien yhdistäminen suuremmiksi yksiköiksi ja uusi opetussuunnitelma edellyttävät merkittäviä muutoksia perinteisiin ratkaisumalleihin. Lisäksi koulurakennukset ovat yhä enemmän erilaisia käyttäjäryhmiä palvelevia monitoimitaloja, jolloin niiden on vastattava sekä tilallisesti että toiminnallisesti lukuisiin erilaisiin ja eri aikoina tapahtuviin käyttöihin, koko rakennuksessa tai vain sen tietyissä osissa. Samaan aikaan vauhdilla etenevä väestön ikääntyminen kasvattaa tarvetta erityisesti tehostetulle palveluasumiselle. Yhtenä osana COMBI-hanketta on tarkasteltu peruskoulujen ja ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen nykyisiä suunnitteluratkaisuja ja niiden muutostarpeita.

Digitalisaatio ja tietotekniikan kehittyminen ovat tuoneet tarjolle uusia mahdollisuuksia esimerkiksi mittalaitteisiin, pilvipalveluihin, laskentatyökaluihin, datan analysointiin ja visualisointiin liittyen. Usein näitä järjestelmiä otetaan käyttöön uusien kohteiden yhteydessä, kun taas olemassa olevissa kohteissa käytetään kyseisen rakennus- tai peruskorjausvuoden mukaisia järjestelmiä. Tällaisessa tilanteessa rakennusten huolto- ja ylläpitohenkilöstön on tarpeen hallita yhtä aikaa hyvin monenlaisia järjestelmiä, vanhoista paikan päällä säädettävistä ilmanvaihtokoneista uusimpiin rakennusautomaatiojärjestelmiin. Tämä osaltaan asettaa kasvavia vaatimuksia järjestelmien hankintapäätöksen tekijöille, suunnittelulle sekä huolto- ja ylläpitohenkilöstön osaamiselle. COMBI-hankkeen puitteissa on selvitetty uusien palvelurakennusten rakennusautomaatiojärjestelmien ominaisuuksia ja käyttöä sekä keinoja sisäilman ja sähkö- ja lämpötehon mittauksien hyödyntämiseksi.

1.3 Eri suunnittelualojen tärkeys ja rooli

Rakennusten arkkitehtonisilla ratkaisuilla on suora vaikutus esimerkiksi tilojen käytettävyyteen ja mahdollisuuksiin hyödyntää tiloja käytön muuttuessa. Talotekniikan sijoittelu ja suunnittelu sekä ikkunoiden vaikutukset päivänvalon saantiin sekä tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutukseen ovat esimerkkejä aiheista, joissa tarvitaan yhteistyötä eri suunnittelualojen kesken. Vanhoja nyrkkisääntöjä ovat olleet esimerkiksi isojen ikkunapinta-alojen suuntaaminen etelään ja rakennuksen muodon yksinkertaistaminen tilojen lämmitystarpeen vähentämiseksi. Uudet rakennukset ovat kuitenkin erilaisia vanhoihin verrattuna, jolloin aikaisemmin yleisesti käytetyt nyrkkisäännöt eivät välttämättä enää päde sellaisenaan. Nykyaikaisen rakennuksen suunnittelussa keskeistä on löytää keinot energiatehokkuuden parantamiseen siten, ettei rakennusten estetiikasta ja toiminnallisuudesta jouduta tinkimään.

Rakennusten vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta on keskeinen osa hyvin toimivaa rakennusta. Kosteus- ja mikrobivauriot rakenteissa voivat aiheuttaa sisäilmahaittoja joko suoraan tai välillisesti, esimerkiksi lisäten erilaisten mikrobiperäisten epäpuhtauksien määrää sisäilmassa tai lisäämällä rakennusmateriaalien emissioita. Rakenteiden energiatehokkuutta parannettaessa tulee rakenteiden läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden lisäksi tarkastella aina myös rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, koska rakenteiden rakennusfysikaalinen vaurioituminen riippuu lähes poikkeuksetta molemmista. Aikaisempien vuosikymmenten rakenneratkaisuja tarkasteltaessa huomataan, että käytännössä jokaisella aikakaudella on käytetty rakennusmateriaaleja tai rakenneratkaisuja, jotka ovat myöhemmin osoittautuneet puutteellisiksi vallinneissa rasitusoloissa ja toteutuneella ylläpidolla. Myöhemmin nämä puutteet on pääosin opittu välttämään, mutta puutteellisia toteutuksia on saatettu joutua korjaamaan pitkään. Aikaisemmin toteutetussa, Tampereen teknillisen yliopiston FRAME-tutkimushankkeessa tarkasteltiin lämmöneristykseen lisäyksen vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan pääosin laskennallisesti, kun taas COMBI-hankkeessa suurin paino rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttäytymisen tutkimusten osalta on ollut erilaisilla laboratoriomittauksilla.

Talotekniset järjestelmät hoitavat useita rakennusten käyttöön liittyviä keskeisiä tehtäviä, kuten tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen sekä ilmanvaihdon, käyttöveden ja viemäroinnin, valaistuksen sekä erilaiset sähkö- ja tietoverkkoliitännät. COMBI-hankkeessa on tarkasteltu erityisesti julkisia palvelurakennuksia, kuten kouluja, päiväkoteja ja palvelutaloja. Näille rakennustyypeille ominaisia taloteknisiä piirteitä ovat kytkeytyminen paikkakunnan kaukolämpöverkkoon, aika- ja/tai käyttöperusteisesti ohjatun koneellisen tulo-poisto-ilmanvaihdon käyttäminen (erityisesti kouluissa ja päiväkodeissa), asuinrakennuksiin verrattuna suuremmat ilmavirrat ja useimmissa tapauksissa rakennusautomaatiojärjestelmien käyttäminen. Energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta katsottuna taloteknisten järjestelmien valinta ja ohjaus sekä niiden toimivuuden varmistaminen ovat keskeisessä roolissa energiatehokkaan ja kokonaisuutena hyvän lopputuloksen saavuttamisessa.

Energiatehokkuuteen liittyvät suunnitelmat sekä niihin liittyvien rakenne- ja taloteknisten järjestelmien toteuttaminen muodostavat perustan energian käytölle rakennuksissa, mutta vasta rakennuksen käyttö määrittää energiatehokkuuden toteutuvan tason. Jos suunnitteluvaiheen arviot tai määräystenmukaisuuden osoittamiseksi tehtävät laskelmat poikkeavat merkittävästi rakennuksen käytönaikaisesta energiankulutuksesta, saatetaan rakennukseen valita kustannuksiltaan tai ominaisuuksiltaan epäoptimaalisia järjestelmiä. Periaatteellisella tasolla yksi vaihtoehto on suunnitella järjestelmät sellaisiksi, että ne toimivat hyvin energiatehokkaasti riippumatta käyttäjien toiminnasta tai ylläpidon tasosta. Toinen ääripää on asettaa rakennusten käytölle ja ylläpidolle niin tiukat vaatimukset,

että rakennusta käytetään vain ja ainoastaan teknisten järjestelmien asettamien tiukkojen vaatimusten mukaisesti. Koska käytännössä molempia lähestymistapoja tarvitaan, joudutaan rakennusten suunnittelussa hakemaan tasapainoa järjestelmien joustavuuden ja käytölle asetettavien vaatimusten välillä. Tutkimushankkeen osalta tämä on tarkoittanut muun muassa eri suunnitteluvaihtoehtojen ja -työkalujen vertailemista sekä ohjeistuksen kehittämistä rakennusten energiatehokasta käyttöä varten.

1.4 Tulosten jalkauttaminen

Tulosten jalkauttamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä tutkimushankkeissa ja muissa kehitysprojekteissa saatujen suositusten ja hyvien kokemusten välittämistä eteenpäin siten, että ne tiedostetaan ja hyödynnetään myös muualla. Tulosten jalkauttaminen voidaan nähdä tilanteesta riippuen joko tiedon jakamisena tai sen vastaanottamisena. Aihe nousi yhtenä tärkeänä aiheena esille COMBI-hankkeen työpajoissa ja ohjausryhmän kokouksissa.

Rakennusalan tiedonhallintaa ja viestintää toteutetaan ja kehitetään muissa yhteyksissä jatkuvasti eteenpäin, mutta tärkeytensä vuoksi se on nostettu esille myös tässä. Seuraavaan listaan on koottu muutamia kokemusperäisiä havaintoja, jotka on nähty hyödyllisiksi ja tärkeiksi tuloksien jalkauttamisessa.

- Tietoa etsitään usein vasta siinä vaiheessa, kun sille on syntynyt jokin tarve. Tällöin on hyötyä siitä, että tiedot ovat keskitetysti saatavilla tai helposti löydettävissä.
- Tiedon tulee olla sellaisessa muodossa, että suhteessa saavutettaviin hyötyihin vastaanottaja pystyy omaksumaankin sen helposti. COMBI-hankkeessa tämä on tarkoittanut muun muassa erilaisten yhteenvetoaineistojen laatimista sekä erilaisten tapaamisten ja seminaarien järjestämistä.
- Sellaisten ihmisten on usein hyvä kokoontua keskenään, jotka joutuvat ratkomaan samankaltaisia ongelmia omilla tahoillaan. Nämä kokoontumiset eivät kuitenkaan saa venyä liian pitkiksi, niitä ei saa olla liian usein ja kokoontumisista tulee olla jotakin konkreettista hyötyä kunkin henkilön omaan työhön.
- Asioiden muuttaminen vaatii yleensä joko lisäresursseja tai olemassa olevien resurssien uudelleen kohdistamista. Muutosten aikaansaamiseksi tulee olla yhteydessä siihen henkilöön, joka pystyy päättämään tarvittavien resurssien käytöstä.
- Asioista innostuminen on tärkeässä roolissa uuden oppimisessa ja uusien menetelmien käyttöön ottamisessa. Tätä asiaa voivat auttaa aidosti tärkeät perustelut asialle, henkilökohtaisen kiinnostuksen muodostuminen ja ympärillä olevien ihmisten vilpittömästä kiinnostuksesta asiaa kohtaan (esimerkiksi Oulun rakennusvalvonnan esimerkki ”hoksauttamisesta”).
- Jaettavan tiedon tulee pitää paikkansa ja sen tulee liittyä johonkin laajempaan kokonaisuuteen mielekkäällä tavalla. Uuden tiedon hyödyntämiseksi tulee ymmärtää sekä asia itsessään, että siihen liittyvät ehdot ja rajaukset.

Listassa esitetyistä asioista osa on teknis-taloudellisia vaatimuksia, mutta osa taas pehmeämpiä arvoja, kuten kokemuksellisuutta ja ihmisten tapoja toimia. Molemmat näkökulmat ovat tärkeitä.

COMBI-hankkeen tulosten jalkautumista hankkeen päätyttyä on pyritty helpottamaan laatimalla laajojen alkuperäisjulkaisujen rinnalle myös lyhyitä tuloskortteja ja niihin liittyviä esitysaineistoja sekä kokoamalla hankkeen suosituksia ja johtopäätöksiä tähän raporttiin sekä lyhyeksi suosituslistaksi. Näistä julkaisuista on kerrottu tarkemmin tämän raportin alkusanoissa sekä liitteissä 2 ja 3.

1.5 Lähteet

Painetut ja sähköiset julkaisut

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU, annettu 19 päivänä toukokuuta 2010, rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleenlaadittu). Euroopan unionin virallinen lehti, L 153/13. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>

Rakennetun omaisuuden tila 2013. ROTI-hankkeen raportti. Saatavissa: www.roti.fi

Reijula, K, Ahonen, G, Alenius, H, Holopainen, R, Lappalainen, S, Palomäki, E & Reiman, M 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. Saatavilla: https://www.eduskunta.fi/FI/tietoaeduskunnasta/julkaisut/Documents/trvj_1+2012.pdf

Työ- ja elinkeinoministeriö 2016. Energiatehokkuus julkisissa hankinnoissa. TEM oppaat ja muut julkaisut 24/2015. Energiaosasto. ISBN 978-952-327-073-2. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-073-2>.

Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksista 66/2009. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090066>.

Vinha, J, Laukkanen, A, Mäkitalo, M, Nurmi, S, Huttunen, P, Pakkanen, T, Kero, P, Manelius, E, Lahdensivu, J, Köliö, A, Lähdesmäki, K, Piironen, J, Kuhno, V, Pirinen, M, Aaltonen, A & Suonketo, J 2013, Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. FRAME-projektin loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka., Tutkimusraportti 159. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>

Internet-lähteet

COMBI-tutkimushanke. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/combi>. Viitattu 21.1.2019

Kosteus- ja hometalkoot. <https://www.hometalkoot.fi/>. Viitattu 21.1.2019

Suomen rakentamismääräyskokoelma. <http://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>. Viitattu 21.1.2019

Terveet tilat 2028. <https://vnk.fi/terveet-tilat-2028>. Viitattu 21.1.2019

2 Energiatehokkaan rakennuksen hankeprosessi ja käyttövaihe

Hankeprosessilla tarkoitetaan tässä yhteydessä uudis- tai korjausrakennushanketta alkaen tarveselvityksestä ja päättyen takuuajan loppumiseen. Käyttövaiheella tarkoitetaan takuuajan päättymisen jälkeen tapahtuvaa rakennuksen käyttöä.

Rakennusten energiatehokkuuteen ja sisäilman olosuhteisiin liittyvää hankeprosessin kehittämistä on käyty läpi esimerkiksi vuonna 2007 valmistuneessa ToVa-käsikirjassa (Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta) sekä vuonna 2014 valmistuneessa TAPRE-dokumentaatiossa (Tampereen alueen palvelurakennukset energiatehokkaiksi). Näihin hankkeisiin liittyvä kehitystyö on ollut yhtenä lähtökohtana COMBI-hankkeessa tehdyille hankeprosessien tarkastelu- ja kehitystyölle.

Seuraavassa yhteydessä hankeprosessia on tarkasteltu energiatehokkuuteen liittyvien toimenpiteiden näkökulmasta. Luvun tavoitteena on antaa vastaus seuraavaan kysymykseen: “Minkälaisella hankeprosessilla julkisten palvelurakennusten rakennushankkeissa luodaan energiatehokkaita rakennuksia ja varmistetaan samalla käyttäjille myös tavoitellut sisäolosuhteet?”

2.1 Hankeprosessi

2.1.1 Havaittuja haasteita

Termit ja yksiköt

Tutkimushankkeen osana käytiin läpi yhden energiatehokkuustavoitteiden osalta kunnianhimoisen päiväkotihankkeen suunnittelukokouspöytäkirjat, energiaselvitykset sekä simulointitulokset. Suunnittelukokouspöytäkirjoissa olevissa kirjauksissa oli kuitenkin useissa kohtaa epätasällisyyksiä tai jopa virheellisyyksiä. Esimerkiksi lämmöntalteenoton hyötysuhdeluvuista ei jälkikäteen pystytty päättämään, mitä suuretta niillä tarkoitettiin. Epäkohtia olivat erityisesti lukujen yhteydessä olevien termien ja yksiköiden epätasällisyys.

Suunnittelun painopisteiden muuttuminen

Tutkimuksessa pidetyissä työpajoissa peräänkuulutettiin vahvasti kokonaisuuden hallintaa. Yksi haaste kokonaisuuden hallinnassa on vanhoista käytännöistä pois oppiminen. Esimerkiksi aiemmin suunnittelutehtävänä oli taata riittävä lämmitysteho eri tiloihin. Nykyään keskeisenä suunnittelun kysymyksenä on lämpökuormien hallinta ja tarpeenmukaiset lämpöolosuhteet tiloissa.

Simulointi

Eri henkilöiden tekemien energiankulutuksen simulointien tulokset poikkeavat tyypillisesti toisistaan johtuen useimmiten mm. käytettyjen simulointiohjelmien eroavaisuuksista ja erilaisesta lähtötietojen valinnasta. Lisäksi laskentatulokset voivat poiketa vielä tätä enemmän toteutuneesta energiankulutuksesta. Määräystenmukaisuuden osoittamisen lisäksi tarvitaan myös tavoitekulutuslaskenta todellisen käytön mukaan, mutta sen tekemiseen ei ole olemassa yhteistä ohjeistusta. Myös näkemykset laskentatarkastelujen tarvittavasta määrästä ja vaiheistuksesta hankeprosessin osaksi vaihtelevat.

2.1.2 Suosituksia hankeprosessin vaiheisiin

Tarveselvityksessä määritetään rakennuksen käyttöprofiilit

Kuntien teknisten henkilöiden kanssa käydyissä keskusteluissa kävi ilmi, että tarveselvitystä ei joissakin hankkeissa laadita lainkaan. Tällöin tilojen todellinen käyttö voi olla hyvin erilaista hankkeen suunnittelijan omaan arvioon tai määräystenmukaisuuslaskennan lähtötietoihin verrattuna.

Kun käyttöprofiilit eli käyttöajat käyttäjämäärineen ja käyttäjäryhmittäin tiedetään, on suunnittelijoilla mahdollisuus suunnitella rakennus toimimaan siten, että käyttäjän ja rakennuksen tarpeet ovat aidosti lähtökohtana. Lämmitystä, valaistusta ja ilmanvaihtoa ohjataan vain sinne ja silloin, kun tiloissa oleskellaan. Ilmaa vaihdetaan erityisesti siellä, missä kosteutta tai epäpuhtauksia syntyy mikrobi- ja kosteusvaurioriskin synnyn minimoimiseksi. Hankkeen valmistuttua tilojen käyttö voi kuitenkin olla erilaista kuin mikä oli suunnittelun perustana ja siksi käyttöönottovaiheessa pitää tehdä vielä tarkistuksia tarpeenmukaisen ohjauksen osalta.

Hankesuunnittelussa asetetaan mitattavat energiatehokkuustavoitteet

Nykyiset rakennuslupaa ja energiatodistuksia varten tehdyt laskelmat ja todellinen energiankulutus eivät vastaa toisiaan palvelurakennuksissa, koska nämä laskelmat tehdään Etelä-Suomen säätiedoilla, pelkistetyille rakennuksille luoduilla standardikäyttöillä ja ilman ulkona tapahtuvaa sähkönkulutusta ja ilman erityiskulutuksia kuten esimerkiksi enintään 10 % kerrospinta-alasta olevat oheistilat. Jos muita laskelmia kuten tavoitekulutuslaskelmia ei tehdä, on hankala tarkistaa jälkikäteen, päästiinkö asetettuihin energiatehokkuustavoitteisiin.

Hankesuunnitteluvaiheessa tulee asettaa riittävästi eritelty energian käytön ja olosuhteiden tavoitteet käyttöprofiilit huomioiden. Tavoitteet tulee asettaa toisaalta paljon energiaa kuluttaville järjestelmille ja toisaalta sellaisille järjestelmille, joihin käyttäjät ja säätötavat voivat vaikuttaa. Energian käytön seuranta helpottaa, jos tavoitteisiin kirjataan myös oleellimmat sähkötehotavoitteet. Kaikille näille järjestelmille tulee järjestää erillismittaus (fyysinen, laskennallinen tai ohjelmallinen) ja niitä ei saa niputtaa epätarkoituksenmukaisesti. Esimerkiksi kerroskohtaisten energiankulutustietojen vertailun perusteella ei ole helposti selvitettävissä, mistä energiankulutuksen väliset erot johtuvat. Järjestelmäkohtaiset mittaukset mahdollistavat käytön aikana esiintyvien poikkeamien syiden etsimisen ja tunnistamisen.

Jatkuva ja hallittu ilmanvaihto on keskeinen tekijä hyvän sisäilman varmistamisessa. Ilmanvaihdon poikkeavat käyntiajat, erillispoistot ja yöaikaiset erikoisratkaisut vaikuttavat merkittävästi energian kulutukseen. Poikkeustilanteiden hallinnassa on vielä selvästi ollut puutteita seurauksena, että ne ovat saattaneet aiheuttaa haitallista ali- tai ylipainetta rakennuksiin. Energiankulutusta ja sisäilmaolosuhteita pitää tarkastella erikseen tilojen aktiivikäytön aikana (normaalisti päivällä) ja erikseen normaalikäytön ulkopuolella (iltaisin, yöllä ja viikonloppuna).

Ehdotussuunnittelussa etsitään uusia ratkaisuja

Rakennuksiin on tarjolla entistä enemmän energiatehokkaita järjestelmiä ja uusiutuvan energian hyödyntämismahdollisuuksia. Kuitenkin useiden järjestelmien yhteensovittaminen on haasteellista ja erityisesti korjausrakentamisen puolelta löytyy paljon esimerkkejä epäonnistumisista.

Sen lisäksi, että hyvässä rakennussuunnittelussa etsitään rakennuksen massoitteeluun ja pohjaratkaisuihin vaihtoehtoja, tulee myös teknisten järjestelmien vaihtoehtoja kartoittaa, arvioida ja vertailla. Esimerkiksi aurinkoenergian hyödyntämiseen on olemassa useita erilaisia vaihtoehtoja. Joidenkin uusimpien

innovaatioiden käyttäminen kuitenkin vaatii niiden huomioimista jo hyvin aikaisessa suunnittelun vaiheessa.

Yleissuunnitteluvaiheessa tehdään laskelmia

Yleissuunnittelun lopputulemana syntyvät rakennuslupa-asiakirjat. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on kuitenkin muistettava, että todellista energian käyttöä ei ole mielekästä verrata suoraan rakennuslupaan tarvittavan energiaselvityksen energialaskelmiin.

Rakennuslupaa varten tehtyjen laskelmien lisäksi on tehtävä myös tavoitekulutuslaskelmat todellisen sijainnin ja todellisen käytön mukaan. Kulutukset on muutettava vastaamaan mahdollisuuksien mukaan paikallisia säätietoja, todellista käyttöprofiilia ja lisäten laskelmiin rakennuslupalaskelmista puuttuvat kulutusosuudet. Tällöin rakennuksen käytön aikana voidaan verrata todellista energian kulutusta tavoitekulutukseen. Tavoitekulutuslaskelmien tekemistä hankaloittaa kuitenkin selkeiden ohjeiden puute, miten tavoitekulutukset ja -tehot kannattaisi laskea, jotta vertailu todelliseen kulutukseen olisi hyödyllistä.

Toteutussuunnitteluun uutta otetta

Teknisten järjestelmien ohjausperiaatteet määritetään toteutussuunnittelun yhteydessä. Niillä on suuri merkitys toteutuvan energiankulutuksen suuruuteen.

COMBI-hankkeessa on luotu ”energiakorttipohja”, jossa muun muassa esitetään ehdotus erikseen mitattaville kulutuskohteille. Uutena pääperiaatteena on, että rakennuksen energian tehon tarve selvitetään sään ja muiden keskeisten muuttujien suhteen. Käyttöönoton jälkeen saadaan nopeasti käsitys rakennuksen energiatehokkuudesta, kun todellista tehonkulutusta verrataan suunnitelmien mukaiseen tehonottoon. Kortin uskotaan helpottavan täsmällisten numeeristen energiatehokkuus- ja sisäilmatavoitteiden asettamista ja todentamista.

Rakentamisen ja järjestelmien monimutkaistuminen synnyttää uusia virhemahdollisuuksia ja epätarkoituksenmukaisia säätötapoja. Vaikka järjestelmät ovat monimutkaisia, pitäisi niiden käytön ja ohjaamisen olla yksinkertaista. Suunnittelijoilta pitää siksi tilata selkeät selostukset järjestelmien päätoimintaperiaatteista ja energiatehokkaan käytön ohjeet eri käyttötilanteisiin.

Rakentamisen laadunvarmistuksessa potentiaalia

Työmaalla rakennuksen elinkaaren aikaiseen energian kulutukseen ja tavoiteltujen sisäilman olosuhteiden saavuttamiseen voidaan vaikuttaa huolellisella eristystyöllä, rakenteiden hyvällä ilmatiiviydellä ja työmaan kosteudenhallinnalla.

Suunnitelmissa tulee esittää riittävästi detaljeja haasteellisista rakenteiden liitoskohdista. Liitokset tulee olla suunniteltuna ja niissä tulee käyttää pitkäaikaiskestäviä rakenneratkaisuja ja materiaaleja. Työn valvonnassa tiiveysmittaukset ja lämpökuvaukset pian vaipan valmiiksi saannin jälkeen toimivat sekä laadunvarmistuksen menetelmänä, että ennaltaehkäisevänä toimenpiteenä. Mittauksista tiedottaminen etukäteen auttaa työntekijöitä ja aliurakoitsijoita huolehtimaan työnsä laadusta läpi koko työmaan keston. Kun vielä mittauksen tulokset käydään asentajien kanssa jälkikäteen läpi, syntyy tekijöille konkreettista osaamista seuraaville projekteille.

Työmaan osalta tulee toteutuksessa varmistaa ehjä kuivaketju ja kuivatettavien rakenneosien osalta riittävät kuivumisajat ja kunnolliset kuivumisolosuhteet. Rakennuksen sisäilman suhteellisen kosteuden mittaaminen ja pitäminen noin alle 60 % RH luo suotuisat olosuhteet rakennusaikaisen kosteuden kuivumiselle. Betonin kosteusmittaus ennen pinnoitustöitä on hyvä vakiintunut käytäntö rakentamisen laadun varmistamisessa.

Rakennukseen asennettavien mittausantureiden sijoittelussa on huomioitava, etteivät lämpökuormat tai ilmavirrat saa ohjata järjestelmiä virheellisesti. Esimerkiksi ilman hiilidioksidipitoisuutta mittaavan anturin sijoittaminen ovipieleen on yleinen esimerkki huonosta mittausanturin sijoituspaikasta.

COMBI-hankkeen osana saatettu valmiiksi AVATER-hankkeessa käynnistetty päivitys terveen talon toteutuksen kriteereistä. Alkuperäiset kriteerit on esitetty toimitila- ja asuinrakentamisen osalta RT-korteissa RT 07-10805 ja RT 07-10832. Nyt tehdyssä päivityksessä on käsitelty erityisesti korjausrakentamista rakennustekniikan näkökulmasta ja sen tavoitteena on ollut tuottaa matalan kynnyksen työkalu, joka sopisi kaikkiin kohteisiin, olisi selkeä käyttää ja auttaisi määrittelemään alkuperäisten korttien tavoitteen määräystasoa paremmasta sisäilman laadusta ja kosteusteknisten riskien pienentämisestä. Kriteerit tulevat COMBI-hankkeen kotisivuille halukkaiden saataville.

Suunnittelijat mukaan käyttöönottoon

Käyttöohjeiden puuttuminen tai niiden huono ymmärtäminen on iso ongelma. Kun järjestelmien toimintaperiaatteita ja niiden käyttöä ei ole dokumentoitu kunnolla, häviää tieto ajan myötä. Nykyiset tehtäväluettelot eivät myöskään automaattisesti vaadi suunnittelijoita osallistumaan käyttöönottoon. Tällöin järjestelmien toimintaperiaatteista eniten tietävä taho ei ole välttämättä mukana tiedon siirtämisvaiheessa, jolloin ymmärrys järjestelmien toimintaperiaatteista voi alun perin jäädä saamatta.

Yksi ratkaisu tähän on, että suunnittelijat ovat mukana käyttökoulutuksissa, joiden yhteydessä käyttöohjeet viimeisteltäisiin. Käyttöohjeiden ja käyttökoulutusten tulee olla sellaisia, että käyttäjät ja muu henkilökunta ymmärtävät ne kunnolla ja osaavat käyttää järjestelmiä ja tehdä säädöt tarkoituksenmukaisiksi. Koulutuksessa urakoitsijoilla ja laitevalmistajilla on myös tärkeä rooli yksittäisten laitteiden opastuksen osalta.

Suunnittelusopimuksia ei pidä tehdä liittämällä pelkät tehtäväluettelot kaavamaiseen sopimuslomakkeeseen. Erikoissuunnittelun tehtäväluetteloiden käyttöönottovaiheeseen liittyviä erikseen tilattavia tehtäviä kannattaa ottaa runsaasti mukaan.

Takuuaikana ohjataan käyttäjät oikeille raiteille

Ennen käyttöönottoa järjestelmät testataan ja säädetään, mutta silloin voidaan kuitenkin tarkistaa ainoastaan toimivatko järjestelmät suunnitelmien mukaisesti ja tavoiteltujen virherajojen puitteissa. Vasta käyttäjien saapumisen jälkeen saadaan aikaan todelliset olosuhteet, jotka taas toisaalta voivat olla erilaiset kuin mihin suunnittelijan ratkaisut perustuivat. Esimerkiksi koulujen välituntikäytännöt ovat voineet muuttua.

Uuden rakennuksen järjestelmien virittäminen vie noin kaksi vuotta. Ensimmäisenä lämmityskautena tarvitaan tehostettua ilmanvaihtoa, jotta rakennusmateriaalien ja kalusteiden päästöt saadaan tuulettua ulos samoin kuin mahdollinen jäljellä oleva rakennekosteus. Vasta toisena vuotena voidaan panostaa energian optimaaliseen käyttöön ja ohjata järjestelmät toimimaan todellisen tarpeen mukaan. Tässä vaiheessa tarvitaan vielä käyttäjien koulutuksen kertaus. Heti käyttöönoton jälkeen henkilöstöllä on suuret paineet ja kiire saada oman ammatin rutiinit käyntiin, joten rakennuksen käyttökoulutukseen ei kiinnostusta ehkä riitä. Kun varsinainen palvelutoiminta pyörii, niin sen jälkeen voisi keskittyä hyvän sisäilman ja energiatehokkuuden varmistamisen osaamiseen. Ensimmäisen parin vuoden aikana myös kaikki käyttöön liittyvät kysymykset ja mahdolliset ongelmat ehtivät nousta esiin. On tärkeätä, että käyttöohjeet valmistuvat viimeistään tilojen käyttöönoton yhteydessä, jotta niitäkin ehditään korjata ja selkeyttää takuuajana.

2.1.3 Sisäilmakorjausten hankeprosessi

Olemassa olevien julkisten palvelurakennusten korjaamiseen ryhdytään pääsääntöisesti jostain muusta syystä, kuin jotta niiden energiatehokkuutta saataisiin parannettua. Tavanomaisia syitä ovat rakennuksen rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien ikääntyminen sekä niissä esiintyvien esteettisten, teknisten ja toiminnallisten puutteiden esiintyminen. COMBI-hankkeessa tehdyn kuntotutkimusaineiston kartoituksen perusteella rakennusten korjaaminen sisältää myös lähes poikkeuksetta erilaisten kosteus- ja mikrobivaurioiden korjaamista. Tällöin tavoitteena on tyypillisesti saada ensisijaisesti korjattua erilaiset vauriot ja parantaa rakennuksen kuntoa korjausta edeltävään ajankohtaan verrattuna ja vasta toissijaisesti parantaa rakennuksen energiatehokkuutta. Kohteesta riippuen sitä koskevat suojeluvaatimukset tai kulttuurihistorialliset arvot vaikuttavat tehtäviin toimenpiteisiin.

Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen tulee kuitenkin ottaa huomioon rakennus- tai toimenpideluvanvaraisen korjaus- tai muutostyön tai käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä (ympäristöministeriön asetukset 4/13 ja 2/17). Jotta tämä voi onnistua turvallisella ja kustannustehokkaalla tavalla, tulee hankkeen osapuolten hallita pääasialliseen korjaushankkeeseen liittyvät toimenpiteet niin hyvin, että myös energiatehokkuuden parantamiseksi tehtävät toimenpiteet voidaan arvioida ja valita tasapainoisesti. Tätä taustaa vasten COMBI-hankkeessa tarkasteltiin sisäilmaepäilyn rakennuksen hankeprosessia sekä korjaushankkeen tarveselvitysvaihetta.

Sisäilmaepäilyn palvelurakennuksen korjaushanke voidaan jakaa selvitys-, korjaus- ja toimivuuden varmistus -prosesseihin seuraavasti:

1. Ensimmäinen prosessi alkaa terveyshaittaepäilystä, jonka jälkeen tehdään tutkimukset ja mittaukset sekä kokonaisvaltainen arviointi, jonka perusteella syntyy päätös etenemistavasta (esimerkiksi korjaus- tai purkupäätös).
2. Jos on päädytty korjausvaihtoehtoon, niin tällöin toinen prosessi jatkuu korjauspäätöksestä suunnittelun, toteutuksen ja toimintakokeiden kautta vastaanottopäätökseen.
3. Kolmas prosessi sisältää muun muassa käyttöönoton ja siihen liittyvät koulutukset, toimivuustarkastukset, käyttäjäkyselyt, olosuhdemittaukset, korjaavat toimenpiteet sekä jatkuvan toimivuuden varmistuksen.

Näiden vaiheiden selkiyttämiseksi COMBI-hankkeessa laadittiin niihin liittyvät kuvaukset sekä koottiin jo olemassa olevia aineistoja yhtenäisen kokonaiskuvan muodostamiseksi.

Listan ensimmäisessä kohdassa tehtävä päätös etenemistavasta voi sisältää laajimmillaan päätöksen olemassa olevan rakennuksen purkamisesta ja uuden rakentamisesta, verrattuna olemassa olevan rakennuksen korjaamiseen. Tätä aihepiiriä tarkasteltiin COMBI-hankkeessa erikseen ja siihen vaikuttavat rakennuksen omistajan omat tarpeet ja resurssit, ylipäätään saatavilla olevat mahdollisuudet, tarkasteltavana olevan rakennuksen tekniset ja toiminnalliset ominaisuudet sekä eri vaihtoehtoihin liittyvät riskit ja niihin suhtautuminen. Tarkastellussa case-kohteessa peruskorjauksen kustannukset nousivat melko korkealle suhteessa uudisrakentamisen kustannuksiin, jolloin purkamis- ja uudisrakentamisvaihtoehtoja vertailtaessa rakennuksen omistaja joutuu arvioimaan raskaan peruskorjauksen päälle tulevan lisäkustannuksen arvoa suhteessa uudisrakentamisesta saataviin hyötyihin.

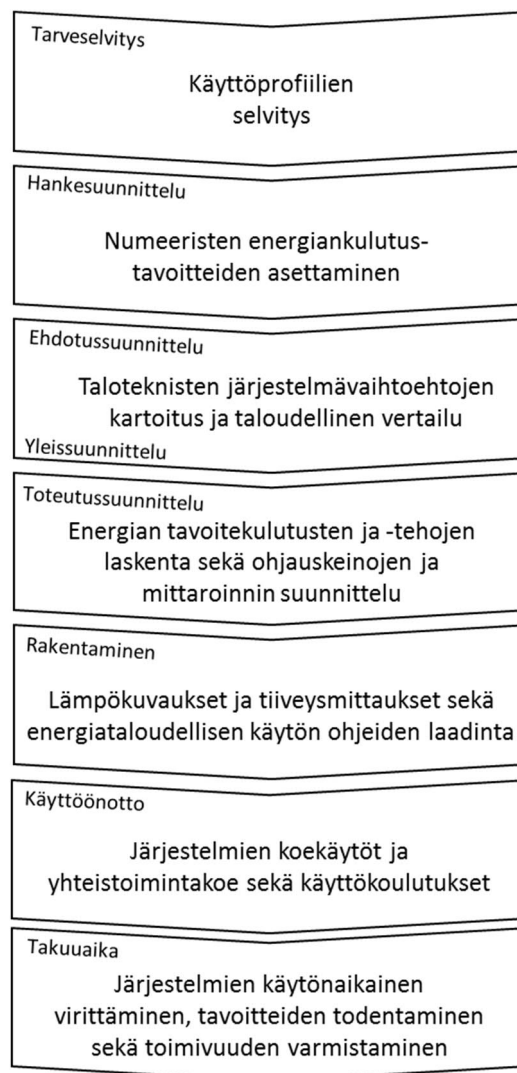
Keskeisenä suosituksena tarveselvitysvaiheen toimenpiteistä on selvittää ja vertailla korjaamis- ja purkamisvaihtoehtojen teknisiä, toiminnallisia ja taloudellisia ominaisuuksia laajasti, erityisesti

hankkeiden koon ja vaativuuden kasvaessa. Tarveselvitysvaiheessa kerättävä tieto auttaa korjausvaihtoehtoon päädyttäessä valitsemaan ja kohdistamaan korjaustoimenpiteitä rakennuksen ja sen käyttäjien tarpeita edellyttävällä tavalla. Purkamisvaihtoehtoon päädyttäessä taas huolellinen tarveselvitys parantaa hankkeen läpinäkyvyyttä ja auttaa perustelemaan purkamisvaihtoehdon tarpeen.

2.1.4 Yhteenveto

Hyvän sisäilman ja energiatehokkuuden tavoittelu ei välttämättä vaadi suuria yksittäisiä muutoksia hankeprosessiin, vaan useita pieniä. Energiatehokkuuden hallinta on tällä hetkellä usein hyvin sirpaleista ja haluttuun tavoitteeseen pääseminen edellyttäisi nykyistä johdonmukaisempaa toimintaa. Hankkeen tavoitteiden selkeä asettaminen ja tavoitteiden todentaminen kohteen valmistumisen jälkeen ovat kriittisimpiä toimenpiteitä. Kun tavoitteet kirjataan systemaattisesti ja vakioidusti energiakorttiin, niin hankeosapuolet tietävät mitä ollaan tekemässä. Ajan myötä osaaminen kumuloituu ja energiatehokkuuden ja hyvän sisäilman aikaansaanti muuttuu arkirutiiniksi.

Edellä esitettyjä suosituksia energiatehokkaan rakennuksen hankeprosessin kehittämiseksi on koottu seuraavaan kuvaan.



Kuva 3. Hankeprosessissa energiatehokkuuden tavoittelu vaatii tiettyjen tehtävien harkittua toteuttamista. Kuvassa esitetään vipuvoimaisia tehtäviä, joiden kautta on mahdollista saavuttaa energiatehokas lopputulos.

Hyvä hankeprosessi voi luoda mahdollisuuden energiatehokkuuteen, mutta ihmiset lopulta ratkaisevat, käytetäänkö energiaa asetettujen tavoitteiden mukaisesti vai tuhлатаanko sitä. Seuraavassa luvussa käsitellään rakennuksen energiatehokkuutta ja toimivuutta takuuajan jälkeen, rakennuksen normaalin käyttövaiheen aikana.

2.2 Rakennuksen toimivuuden varmistaminen käyttövaiheessa

2.2.1 Lähtökohta

Lähtökohtaisesti ainoastaan toimiviksi saatetuilta ja todennetuilta sekä toimivina pidetyiltä talotekniikkaratkaisuilta voidaan odottaa energiatehokkuutta. Olemassa olevat ja uudet talotekniset ratkaisut tulee aina tarkastella kustannusnäkökohtien lisäksi ratkaisun toimivuuden näkökulmasta erikseen kulloiseenkin kohteeseen. Toimivuuden varmistamista tulee tehdä koko rakentamisprosessin ajan. Tyypillisiä toimimattomuutta selittäviä tekijöitä ovat henkilöresurssien puute, mutta myös osaamattomuus. Esimerkiksi taloteknisten järjestelmien lisääntynyt käyttö ja niiden monimutkaistuminen lisäävät tarvetta käyttää aikaa järjestelmiin perehtymiseen, kykyä keskustella eri alojen asiantuntijoiden kanssa ja lisäksi myös järjestelmien säännöllistä käyttämistä osaamisen ylläpitämiseksi.

Kohteissa tehtyjen toimivuustarkastelujen (katselmus, haastattelut, mittaukset) perusteella kaksi seikkaa nousi esiin ylitse muiden perinteisten vikalistojen lisäksi: Käyttäjät ja huoltohenkilökunta eivät olleet tietoisia tavoiteltavista olosuhteista ja toisena, että huoltohenkilökunnalla esimiehineen ei ollut aikaa analysoida kerättyä mittaustietoa ja tehdä sen pohjalta kehittämistyötä.

2.2.2 Tavoitteiden tunteminen ja niiden saavuttamisen seuraaminen

Rakennusten suunnitteluvaiheessa luodaan usein runsaasti dokumentteja ja myös laskentaohjelmien laskentatiedostoja, mutta varsinkin vanhemmista kohteista näitä tietoja oli usein hyvin vaikeasti saatavissa. Lisäksi joitakin tietoja voi olla hyvin vaikea selvittää jälkikäteen tarkoituksellisestikaan, jolloin rakennuksen alkuperäisen dokumentaation saatavuus on erittäin tärkeää. Tällöin tietysti edellytyksenä on, että kertynyt dokumentaatio sisältää kattavat ja oikeat tiedot tarkasteltavasta kohteesta. Joka tapauksessa rakennuksista kertyvän tiedon huolellinen ja selkeä arkistointi on erittäin suositeltavaa. Myös esimerkiksi laskentaohjelmien tulosteiden lisäksi itse projektitiedostojen arkistointi mahdollistaisi myöhemmin huomattavasti yksityiskohtaisemman kohteen arvioinnin, kuin pelkkien lopputulosteiden avulla tehtynä.

COMBI-hankkeessa kehitettiin yksinkertainen arviointiasteikollinen toimivuustarkastuskortti. Sen tavoitteena on viestittää muillekin kuin rakennus- ja talotekniikka-alan ammattilaisille tarkasteltavan kiinteistön ammattilaisen arvioima kunto. Päättäjätasoiset henkilöt saavat näistä kiinteistökohtaisista korteista yleiskuvan, missä määrin julkisissa, heidän hallinnoimissaan kiinteistöissä on kehittämistarpeita. Yleiskuvan perusteella on entistä helpompi täten arvioida mm. resurssitarpeita koko kiinteistökannan hoidossa.

Käytön aikaisessa energian tarpeenmukaisessa käytössä avainasemassa on energian kulutuksen sopivan tarkka mittaaminen ja seuranta. Ajallista tarpeenmukaista käyttöä on helpointa seurata tehoseurannan avulla. Sopivan tarkka taso on määritettävä projektikohtaisesti, ja se on otettava huomioon energian alamittauksissa. Rakennusautomaatioon on ohjelmoitava hälytys, mikäli kulutus tai sisäilman laatu eivät ole tavoitteiden mukaisia. Käytön aikana rakennusten, käyttäjien ja kiinteistön ylläpitäjien yhteispeli on välttämätöntä.

Lämpöhäviöiden tasauslaskelmaa kannattaisi kehittää eteenpäin toteutuvan lämmitysenergiankulutuksen nykyistä tarkempaa arviointia varten, koska tällöin se voisi tehokkaasti toimia riittävän helppokäyttöisenä, mutta kuitenkin hyödyllisenä ja laajasti käytettävissä olevana työkaluna. Yksi mahdollisuus olisi kytkeä se COMBI-hankkeen energiakorttipohjaan, jolloin rakennuksen suunnitteluvaiheessa arvioidun käytön mukainen energian- tai tehonkulutus määritettäisiin muiden menetelmien ohella myös lämpöhäviöiden tasauslaskelma -tyyppisen työkalun avulla. Kun rakennuksen käytön aikana saadaan tarkempaa tietoa toteutuneista järjestelmistä ja niiden käytöstä, olisi kyseisen suunnitteluratkaisun tavoitearvojen päivittäminen nopeaa.

Julkisten palvelurakennusten käyttö tapahtuu toistuvan viikkorytmin mukaan, kun taas rakennusten energiankulutusraportteja laaditaan usein kuukausikohtaisten tietojen avulla. Palvelurakennusten energiaseurantaraporteissa tulisi siirtyä viikkokohtaisten tietojen seurantaan. Raportit itsessään voidaan edelleen haluttaessa laatia tätä harvemmin.

2.2.3 Resurssien riittävyys

Työntekijöiden resurssipula näkyi esimerkiksi rakennusautomaatiojärjestelmien osalta siinä, että niitä käytettiin vain harvoin siinä laajuudessa, kuin mitä järjestelmien ominaisuudet mahdollistaisivat. Yksittäisillä ylläpitohenkilökunnan jäsenillä voi olla seurattavanaan hyvin suuri määrä kohteita, joissa käytettävät järjestelmät vaihtelevat tapauksesta toiseen. Isoimpien kaupunkien ylläpitämissä rakennuksissa on käytössä useiden eri toimittajien järjestelmiä (mikä voi olla myös hyvä asia) ja näistä useita eri versioita ja käyttöliittymiä.

Yhtenä käytännönläheisenä ratkaisuna koettuun henkilöresurssipulaan uusilta rakennusautomaatiojärjestelmiltä toivottiinkin selkeästi yksinkertaisempia käyttöliittymiä. Rakennusautomaatiojärjestelmiä olisi siis suositeltavaa kehittää sisältämään sellaisia mittausdatan analyyskejä ja visualisointeja, jotka toistuisivat samankaltaisina kohteesta toiseen ja antaisivat tietoa vallitsevan tilanteen lisäksi myös järjestelmän toimivuudesta suhteessa tavoitearvoihin (liikennevalot, Shewhart-kuvaajat, yms.). Tällaisten työkalujen kehittäminen ja käyttöönotto on suositeltavaa pyrkiä tekemään yhteistyössä järjestelmätoimittajan, automaatio suunnittelijan, talotekniikkasuunnittelijan ja loppukäyttäjien kesken.

Rakennusten siivoushenkilökunnalla oli halukkuutta laajentaa työnkuvaansa myös olosuhdetarkkailijoiksi, jolloin mahdolliset puutteet tai muutokset olosuhteissa tulisivat nopeammin huomattua ja viestitettyä eteenpäin. Tällainen muutos todennäköisesti parantaisi olosuhteiden seurantaa, mutta siivousalan kilpaillun tilanteen vuoksi ei todennäköisesti kuitenkaan ratkaisisi kiinteistönpitohenkilökunnan resurssihaasteita.

Resurssien riittävyyden varmistaminen edellyttää soveltuvia rakennus- ja talotekniikka-alan koulutuspolkuja ja myöhemmin täydennyskoulutuksia ja –kouluttautumista, selkeitä ja havainnollisia työkaluja ja säätojärjestelmiä sekä kiinteistönomistajien osalta riittävien henkilö- ja aikaresurssien kohdistamista rakennusten ennakoiwaan ylläpitoon. Rakennusautomaatiojärjestelmien nykyistä tehokkaampi hyödyntäminen mahdollistaisi myös ennakoivaa kiinteistönpitoa tukevien virherajojen ja hälytysten lisäämisen automaatiojärjestelmiin, jolloin kiinteistönpitohenkilökunnan työpanoksesta nykyistä suurempi osuus kohdistuisi ennakoiwaan toimintaan.

3 Arkkitehtuuri ja tilat

Peruskoulujen ja ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen kohteiden nykytilan kartoittamisen sekä laajojen simulointitarkastelujen pohjalta laadittiin Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto, joka havainnollistaa suunnitteluratkaisujen vaikutusta sekä energiatehokkuuteen että arkkitehtoniseen laatuun. Vaikka työpaketissa tarkasteltiin ennen kaikkea ikääntyneiden tehostettua palveluasumista ja peruskouluja, ovat tutkimuksen tulokset sovellettavissa esimerkiksi asuinrakentamiseen, muihin koulutyyppeihin, päiväkoteihin ja monitoimitaloihin.

3.1 Nykyiset suunnitteluratkaisut palveluasumisessa ja peruskouluissa

Ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen tilalliset ja toiminnalliset toteutustavat osoittautuivat paljolti itseään toistaviksi. Ryhmäkotimuotoinen palveluasuminen esiintyi kaikissa tarkastelukohteissa palvelutarjonnallisesti tehokkaasti osana laajempaa palveluasumisen kokonaisuutta, johon kuului muun muassa itsenäisemmän palveluasumisen asuntoja sekä jaettuja oleskelu-, ruokailu- tai muita palvelutiloja. Lineaariset keskikäytävämallin variaatiot hallitsivat ryhmäkotien pohjaratkaisuissa ja yksiköt toimivat selkeän itsenäisinä kokonaisuuksinaan. Tilamitoitus oli etenkin asuntojen osalta pääosin hyvin kompaktia alittaen usein nykyiset mitoitussuosituksiset. Asukkaiden yhteiset tilat painottuivat suuriin avotiloihin, jotka ovat valvottavuuden näkökulmasta tehokkaita, mutta esimerkiksi kodintunnon, rinnakkaiskäytön ja asukkaan valinnanvapauden kannalta ongelmallisia eivätkä täten suositeltavia.

Tehostetun palveluasumisen tilaratkaisuja ei ole enää mahdollista tehostaa mitoitusta tiivistämällä. Sen sijaan tulee kehittää tilojen soveltuvuutta aiottuihin käyttötarkoituksiin sekä mukautuvuutta näiden käyttötarkoitusten muutokseen. Korvaamalla suuria avosaleja joukolla pienempiä, yhdisteltävissä olevia tiloja voidaan lisätä kodikkuutta, kokonaisuuden joustavuutta sekä käyttöön mukautuvien teknisten järjestelmien hyödyntämistä, jolla on erittäin merkittävä vaikutus energiatehokkuuteen. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi ilman hiilidioksiditason mukaan säätävä ilmanvaihto tai luonnonvalon määrään reagoiva valaistus. Jakamalla osa tiloja yksiköiden kesken voidaan parantaa tilojen käyttöastetta ja täten käytännön energia- ja jopa materiaalitehokkuutta merkittävästi. Vastaava mahdollisuus tulee soveltuvien tilojen osalta ottaa huomioon myös ulkopuolisen käytön suhteen erityisesti laajemmissa palveluasumiskokonaisuuksissa.

Ryhmäkodeille vastakkaisesti peruskoulujen tilallisten ja toiminnallisten suunnitteluratkaisuiden havaittiin poikkeavan toisistaan merkittävästi verrattaessa keskenään niin kaupunki- ja maaseudun kouluja, historiaa ja nykytilaa, kuin nykypäivän eri peruskoulukohteitakin. Tutkimukseen poimituista 2000-luvun esimerkkikohteista tunnistettiin seitsemän erilaista ryhmittelyä niiden tilallisten ja toiminnallisten ominaisuuksien perusteella, mikä kertoo koulujen ratkaisumallien moninaisuudesta. Lisäksi peruskoulujen todettiin yleisesti toimivan alueen identiteettiä korostavina, yksilöllisinä ja toisinaan näyttävinä rakennuksina. Peruskoulujen arkkitehti- ja tilasuunnittelu muuttui merkittävästi elokuussa 2016 käyttöön otetun uuden opetussuunnitelman ja sen vaatiman uudenlaisen toiminnallisuuden myötä.

Peruskoulujen arkkitehtisuunnittelu heijastaa aina ensisijaisesti opetusmetodien toiminnallisia vaatimuksia, jotka siten muodostavat perustan energiatehokkuudelle. Lisäksi peruskoulujen moninainen kirjo asettaa haasteita yleispätevien energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden esittämiselle. Yhteisenä suosituksena voidaan kuitenkin esittää koulujen käytön tehostamista. Tähän kuuluu muun muassa vajaa- ja tyhjäkäytön välttäminen ilta-, viikonloppu- ja loma-ajan käytön systemaattisen lisäämisen avulla. Konkreettisesti tämä on toteutettavissa suunnitteleamalla rakennuksen tilat useita

käyttöjä tukeviksi tai vyöhykkeistämällä eli ryhmittelemällä tilat käytön mukaisesti, jolloin saavutetaan sekä energiatehokkuudellisia että käyttötehokkuudellisia etuja. Yhdistämällä tilavyöhykkeet tarpeenmukaisen talotekniikan kanssa mahdollistetaan merkittäviä parannuksia peruskoulujen energiatehokkuuteen.

3.2 Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun arviointikeinot

Nykyisin rakennuksen energiatehokkuutta tarkastellaan tavallisimmin suhteessa lämmitettyyn nettoalaan, esimerkiksi laskettaessa E-lukua. Tutkimuksessa tällaiset pinta-alapohjaiset indikaattorit havaittiin riittämättömiksi käytön tehokkuutta painottavaan suunnitteluun. Niin tilamitoituksen tiivistäminen, käyttäjämäärän lisääminen kuin käyttöaikojen laajentaminenkin esiintyivät näillä indikaattoreilla energiatehokkuuden kannalta epäsuotuisina. Käyttöä tehostavat suunnitteluratkaisut kasvattivat energiankulutusta neliometriä kohden ja täten näennäisesti huononsivat tuloksia, vaikka varsinainen rakennuksesta saatava hyöty suhteessa käytettyyn energiamäärään olisi lisääntynyt.

Pinta-alapohjaisten indikaattorien lisäksi rakennuksen suunnittelussa sekä käytönjälkeisessä arvioinnissa tulee käyttää myös rakennuksesta saatavan konkreettisen hyödyn huomioon ottavia mittareita. Erääksi tällaiseksi mittariksi tutkimuksessa esitetään käyttötehokkuutta, joka kuvastaa käyttäjien rakennuksessa viettämää aikaa suhteessa energiankulutukseen. Mittaria voidaan hyödyntää jo varhaisissa vaiheissa suunnitteluarvoilla sekä myöhemmin toteutuneen tilanteen arviointiin. Vastaavia tarkastelutapoja voidaan kehittää myös rakennustyyppikohtaiseen arviointiin, esimerkiksi suhteuttamalla opetusrakennuksen toteutuneita oppimistuloksia toteutuneeseen energiankulutukseen. Keskeistä on ottaa energiatehokkuuden arvioinnissa huomioon rakennuksesta saatava käytännön hyöty. Kokonaisvaltaisesti onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi erilaiset arviointikeinot on pidettävä mukana koko suunnitteluprosessin ja toteutuksenjälkeisen seurannan ajan.

Käyttötehokkuuden rinnalla arkkitehtisuunnittelun merkitystä korostava tarkastelutapa on rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskeminen, joka ottaa huomioon käytetyt materiaalit ja niiden määrän. Myös energiatehokkuus pyrkii rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ja siten rakennuksen hiilijalanjäljen parantamiseen, mutta saattaa olla ristiriidassa hiilijalanjäljen kannalta suotuisten toimenpiteiden kanssa. Esimerkkeinä ristiriitatilanteista toimivat muun muassa vaipan paksuus ja eristemateriaalin määrä sekä laatu, tai rakennuksen koko, jotka kaikki ovat keskeisiä arkkitehtonisia suunnitteluratkaisuja.

3.3 Energiatehokkuuden kannalta keskeisimmät arkkitehtisuunnittelun ratkaisut

3.3.1 Käyttöä tukeva tilojen ja tekniikan suunnittelu

Yksittäisten rakenteellisten ja massoitteellisten ratkaisujen, kuten vaipan U-arvojen ja monimuotoisuuden, vaikutus energiankulutukseen oli tässä tutkimuksessa pieni verrattuna useisiin käyttöön ja tekniikkaan liittyviin valintoihin. Energiatehokkuudellisesti merkittävimmiksi aiheiksi puolestaan osoittautuivat ilmanvaihto, lämmitys ja todellisen käytön huomioon ottaminen, joiden onnistuneet ratkaisut ovat kiinteästi kytköksissä arkkitehtisuunnitteluun. Vastaavasti erityisen keskeinen vaikutus oli tilakohtaisesti käytön mukaan säätävällä ilmanvaihdon ilmamäärällä. Näin ollen hankkeessa painotettu suunnittelun kokonaisvaltaisuus ja eri osapuolten yhteistyö osoittautuivat avaintekijöiksi konkreettisesti energiatehokkaan kohteen toteuttamisessa.

Energiatehokkaan rakennuksen suunnittelussa tilojen todellinen käyttö ja sitä tukevat tekniset ratkaisut tulee nähdä kokonaisuutena suunnitteluprosessin alusta saakka. Tilat on muun muassa rajauksensa

osalta suunniteltava siten, että sisäolosuhteet voidaan säätää dynaamisesti kulloisenkin käytön mukaan. Lisäksi rakennuksen on oltava tarvittaessa käytettävissä vain osittain ilman, että käytön aikaisia olosuhteita joudutaan ylläpitämään tarpeettoman suurella alueella. Näin ollen myös tilojen sijoittelussa sekä kulkuyhteyksissä on otettava huomioon erilaiset käyttötilanteet. Erilaiset käyttötarpeet ja -aikataulut on kartoitettava jo suunnittelun alkuvaiheessa, jotta ne voidaan ottaa huomioon kokonaisuudessa.

3.3.2 Ikkunasuunnittelu ja aurinkosuojaus

Lämmityskaudella ikkunoiden kautta tiloihin tuleva auringonsäteily vähentää tilojen lämmitysenergiankulutusta, mutta toisaalta nostaa sisäilman lämpötilaa ja voi kasvattaa jäähdytystarvetta kesäkaudella. Tässä luvussa käsitellään ikkunoiden arkkitehtisuunnittelun vaikutuksia rakennusten energiankulutukseen. Valaistuksen toteuttamista on käsitelty tarkemmin erikseen tämän raportin talotekniikkaosiossa.

Tehdyissä tarkasteluissa suurin osa tilojen energiankulutuksesta kului tilojen lämmitykseen ja valtaosa lopusta tilojen jäähdytykseen. Valaistuksen energiankulutus jäi kauttaaltaan pieneksi näihin kahteen verrattuna. Lämmitysenergiankulutus Pohjois-Suomen olosuhteissa oli huomattavasti suurempaa kuin Etelä-Suomen olosuhteissa: Tarkastellun kohteen eri tapausten pienin ostoenergiankulutus oli Pohjois-Suomen olosuhteissa lähes kaksinkertainen pienimpään Etelä-Suomen olosuhteissa saavutettuun ostoenergiankulutukseen verrattuna. Rakennusten todellista energiankulutusta arvioitaessa ja tarkempia suunnitteluratkaisuja valittaessa tulee käyttää rakennuksen sijaintipaikkakunnan mukaisia säätietoja.

Lämmitysenergian kulutuksen suuren osuuden vuoksi ikkunoiden U-arvon ja pinta-alan pienentäminen pienensivät keskimäärin tarkasteltujen tapausten kokonaisostoenergiankulutusta. Toisaalta lämmityksen pienin ostoenergiankulutus saavutettiin Etelä-Suomen olosuhteissa suurilla ja Pohjois-Suomen olosuhteissa keskisuurilla etelään suunnatuilla ikkunoilla, joilla oli matala U-arvo ja korkea g-arvo. Varjostamattomina jäähdytysenergiankulutuksen kasvu kasvatti kuitenkin kokonaisostoenergiankulutusta huomattavasti. Energiatehokkain ratkaisu muodostuisi siis suurista tai keskisuurista etelään suuntautuvista ikkunoista, joilla on matala U-arvo sekä korkea g-arvo ja joissa hyödynnettäisiin säädettävää aurinkosuojausta.

Olemassa olevissa palvelurakennuksissa on usein käyttäjien säädettävissä olevat sälekaihtimet, mutta käytännössä sälekaihtimia ei juurikaan käytetä rakennusten päivärytmin ja vuodenaikojen mukaan, vaan ne ovat pitkiä aikoja paikoillaan samassa asennossa. Koska aurinkosuojausten tarpeenmukainen säätäminen kuitenkin auttaisi lämmitys- ja jäähdytystarpeen pienentämisessä, on seuraava vaihtoehto tällöin käyttää automaattisesti säätyvää aurinkosuojausta. Automaattisen aurinkosuojauksen käyttö lisää investointi- ja huoltokustannuksia sekä käyttäjien ja huoltohenkilökunnan koulutustarvetta, jotka tulee ottaa huomioon eri vaihtoehtojen taloudellisuustarkasteluissa. Erityisen hyvää energiatehokkuutta tavoiteltaessa automaattisten aurinkosuojausten käyttö voi kuitenkin auttaa pienentämään lämmityksen, jäähdytyksen ja päivänvalo-ohjausta hyödynnettäessä myös valaistuksen ostoenergiankulutusta.

Tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen energiankulutuksen suhteelliset osuudet vaihtelivat huomattavasti tapauskohtaisesti ja merkittävää jäähdytystarvetta esiintyi tietyissä tapauksissa kaikilla Suomen ilmastovyöhykkeillä. Ikkunan pinta-alaosuudella ulkoseinästä oli huomattava vaikutus lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiankulutukseen, mutta näiden suhde vaihteli huomattavasti tapauksittain. Pieni ikkuna ei ollut kauttaaltaan energiatehokkain. Tilan muodolla (kapea/leveä) oli merkittävä vaikutus ostoenergiankulutuksen kokonaismäärään, mutta ensisijaisesti ulkovaipan määrän kautta, joten vaikutus tasaantuisi tarkasteltaessa yksittäisen huoneen sijaan kokonaista rakennusta. Ikkunan sijoittelulla

ulkoseinälle ei ollut käytännössä lainkaan vaikutusta ostoenergiankulutukseen. Johtopäätöksenä tilojen ikkunavalinnoilla, aurinkosuojauksilla ja pohjamuodolla voi olla huomattava vaikutus tilan sisälämpötiloihin ja ostoenergiankulutukseen, mutta näiden tekijöiden vaikutukset riippuivat toisistaan. Näin ollen rakennusten ikkuna-, valaistus- ja aurinkosuojausratkaisut tulee tarkastella tapauskohtaisesti ympäristön sekä tavoitellut olosuhteet ja tilojen käyttö huomioon ottaen. Keskeistä on ottaa huomioon myös toiminnalliset ja esteettiset seikat, kuten luonnonvalon hyödyntäminen, tilojen käytettävyys ja rakennusten arkkitehtoninen laatu.

3.4 Arkkitehtoninen laatu energiatehokkaassa suunnittelussa

Koska yksittäisillä massoittelemalla ja rakenteiden ratkaisuilla oli pääosin hillitty vaikutus energiankulutukseen, energiatehokas suunnittelu ei edellytä kompromisseja arkkitehtonisessa laadussa. Esimerkiksi ikkunapinta-alan ja vaipan monimuotoisuuden minimoiminen eivät osoittautuneet energiatehokkuuden kannalta välttämättömiksi, mikäli ikkunoiden varjostus, suuntaus ym. Ominaisuudet on suunniteltu tarkoituksenmukaisesti ja vaipparakenteet ovat vähintään nykymääräysten mukaiset. Arkkitehtonisesti laatu ja energiatehokkuus kytkeytyivät kiinteästi toisiinsa tarkoituksenmukaisessa ja kokonaisvaltaisessa käytön suunnittelussa, joka vaikuttaa keskeisesti kumpaankin.

Vaikka laatutekijöitä on vaikea arvioida laskennallisen energiatehokkuuden rinnalla, arkkitehtonista laatua ja energiatehokkuutta on suunnittelussa lähestyttävä saman kokonaisuuden toisiinsa kytkeytyvinä osina. Arkkitehtonisesti laadukkaat ratkaisut tukevat rakennuksesta saatavaa käytännön hyötyä ja täten konkreettista energiatehokkuutta. Muun muassa lämpöhäviöiden kannalta suotuisat rakenteelliset ratkaisut ja muodonanto ovat osa onnistunutta kokonaisuutta, mutta niiden ei tarvitse lähtökohtaisesti rajoittaa tilallisia ja toiminnallisia valintoja. Kestävä ja pitkällä aikavälillä energiatehokas sekä ympäristöystävällinen rakennus on suunniteltava mukautumaan muuttuviin käyttötarpeisiin. Tämän suhteen tulee muuntojoustavuudessa ottaa huomioon sekä tilalliset että niitä tukevat talotekniset ja rakenteelliset näkökulmat.

4 Rakenteet

4.1 Rakennusten kosteusvauriot

Olemassa olevien rakennusten kosteusvaurioiden laajuuden ja syiden selvittäminen tarjoaa mahdollisuuden oppia aiemmasta rakentamisesta ja rakennusten ylläpidosta. Olemassa olevan tiedon hyödyntäminen on kustannustehokasta ja nopeaa rakenteiden korjaustarpeita ennakoidessa. Yhtenä osana COMBI-hanketta käytiin läpi 168 kappaletta jo toteutettujen, laajojen kosteus- ja sisäilmateknisten kuntotutkimusten kuntotutkimusraportteja rakenteiden kosteusteknisen toiminnan osalta ja selvitettiin kyseisestä aineistosta tehtäviä johtopäätöksiä. Tästä aineistosta on tärkeää muistaa, että se kuvastaa otokseen päätyneitä rakennuksia, mutta ei kaikkia palvelurakennuksia. Lisäksi, koska aineisto kuvaa sitä laajempaa ajanjaksoa, jolloin nykyisten kuntotutkimusohjeiden on katsottu pääosin olleen voimassa, on tilanne uusimmissa rakennuksissa voinut muuttua aineiston keskimääräisestä tilanteesta.

Yksi rakenteiden kosteus- ja mikrobivaurioita käsitteleviä kuntotutkimusraportteja yhdistävä piirre oli, että suurin osa kuntotutkimuksista oli tehty vasta siinä vaiheessa, kun kohteessa oli jo epäily sisäilmaongelmasta tai rakennukseen oltiin joka tapauksessa käynnistämässä peruskorjausta lähivuosina. Rakennusten päivittäistä huoltoa ja ylläpitoa tiedetään toteutettavan jatkuvasti sisäilmaepäilyistä riippumattakin, mutta ennakoivan kiinteistönpidon helpottamiseksi laajempia kuntotutkimuksia tulisi teettää nykyistä aikaisemmin.

Rakenne- ja sisäilmateknisistä kuntotutkimusraporteista ei saatu tarpeeksi tietoa ilmanvaihtojärjestelmän toimivuuden arvioimiseksi. Tämän tiedon puuttumista voi selittää joko sillä, että ilmanvaihtoteknistä kuntotutkimusta ei oltu alun perinkään tilattu tai suoritettu, tai sitten kyseinen osio on tehty ja raportoitu erikseen. Koska sisäilman olosuhteet, rakenteet ja talotekniikka kuitenkin liittyvät useilla eri tavoilla toisiinsa, tulee edistää rakenne-, sisäilma- ja ilmanvaihtoteknisten asioiden tarkastelemista kokonaisuutena, esimerkiksi ottamalla tämä asia huomioon kuntotutkimuksia kilpailutettaessa ja kuntotutkimusyritysten tehtävänantoja määriteltäessä. Etenkin sisäilmaongelmista kärsivissä kohteissa on tärkeää selvittää ilmanvaihdon toimivuus yhdessä muiden taloteknisten ja rakenneteknisten tekijöiden kanssa.

Aineistossa ei ollut ainuttakaan rakennetyyppeä, jossa ei olisi esiintynyt jossain kohteessa korjaustarvetta. Korjaustarve oli suurempaa vanhemmissa rakennuksissa, mutta korjaustarvetta esiintyi jonkin verran myös verrattain uusissa rakennuksissa. Kosteusvaurioiden syitä on olemassa useita erilaisia, kuten lähtökohtaisesti puutteellisesti toimiva rakenne, puutteellinen toteutus tai normaalista poikkeava rasisustilanne. Kaikkien edellä mainittujen asioiden huomioon ottaminen rakennetta korjattaessa on tärkeää. Erityisesti huomiota tulee kiinnittää vanhojen rakenteiden kykyyn sietää erilaisia vikatilanteita.

Tehdyistä kosteusmittauksista suuri osa kohdistui maanvastaisiin alapohja- ja seinärakenteisiin, joista oli myös mitattu eniten korkeita suhteellisen kosteuden arvoja. Samassa aineistossa välipohjista ja erityisesti väliseinistä oli tehty huomattavasti vähemmän mittauksia, mutta korkeiden suhteellisen kosteuden mittaustulosten osuus oli kuitenkin myös näissä rakenteissa korkea. Huomattavassa osassa rakennuksia ei myöskään oltu tehty lainkaan kosteusmittauksia. Näiden tulosten perusteella rakennusten kosteusmittauksien tekemistä tulisi kehittää siten, että mittauksia tehtäisiin tasaisemmin eri rakenneosista (erityisesti myös välipohjista ja väliseinistä). Aikaistettaessa kuntotutkimusten tekemistä vastaamaan paremmin ennakoivan kiinteistönpidon tarpeita, tulee myös kuntotutkimusmenetelmiä ja

kosteusmittausten analysointia kehittää vaurioalttiiden rakenneratkaisujen tunnistamiseksi ja luokittelemiseksi nykyistä aikaisemmassa vaiheessa.

Kosteusmittauksia ja niiden vertailumittauksia raportoitaessa tulee kirjata näkyviin myös mittauksen syy. Tämä auttaa esimerkiksi rakenteiden vaurioitumista koskevan tiedon siirtämisessä kuntotutkijoilta rakennesuunnittelijoille.

4.2 Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet

Rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien tunteminen on keskeinen edellytys laadukkaiden laskentatarkastelujen toteuttamiselle. Käytännössä materiaaliominaisuudet tunnetaan kuitenkin vain osittain tai jotakin laajempaa materiaalityhmää edustavan aineiston kautta. Rakennusfysikaalisten simulointiohjelmien materiaalikirjastoihin ja esimerkiksi kansainvälisiin standardeihin on koottu paljon erilaisia arvoja, mutta näiden vastaavuudesta käsillä olevaan materiaaliin ei ole aina täyttä varmuutta. Jos materiaaliominaisuudet tunnettaisiin paremmin, pystyttäisiin tarkemmin esimerkiksi arvioimaan eri rakenne- ja materiaalivaihtoehtojen vaikutuksia, tekemään kuivumisaika-arvioita sekä arvioimaan rakenteiden herkkyyttä erilaisille vikatilanteille.

Betoni rakennusmateriaalina sisältää laajan kirjon erilaisia lopputuotteita ja sen valmistaminen sekä käyttö rakennuksissa sisältävät useita muuttujia. Näistä muutamia ovat esimerkiksi betonin koostumus ja lisäaineet, betonin lujuuden kehittyminen ja lämmöntuotto, kuivuminen ja kutistuminen, ympäröivät olosuhteet ja rasitusolojen kestävyys sekä valmistustavat, valaminen ja jälkihoito. Lukuisista muuttujista johtuen kulloinkin käytetyn betonin ominaisuuksien tarkka tunteminen on käytännössä mahdotonta.

Rakenneosien rakennusfysikaalisen toimivuuden näkökulmasta katsottuna betonirakenteet liittyvät myös moniin muihin materiaaleihin, kuten lämmöneristeisiin ja pintamateriaaleihin, jolloin on tarpeen tarkastella näiden kaikkien materiaalikerrosten muodostamaa kokonaisuutta. COMBI-hankkeen yhtenä osana määritettiin ontelolaatta- ja seinäelementtibetonin rakennusfysikaalisia kosteusominaisuuksia. Lisäksi rakennusfysikaalisia materiaaliominaisuuksia määritettiin markkinoilla oleville kalsiumsilikaattilevyille ja yhdelle valkokalkkilevyille, joita erityisesti Keski-Euroopassa on suositeltu käytettäväksi tiilirakenteiden sisäpuolisena lisälämmöneristeinä.

Testattujen kalsiumsilikaattilevyjen ja yhden valkokalkkilevyn osalta mittaustulokset ja valmistajien tuotteille ilmoittamat arvot vastasivat toisiaan pääosin hyvin. Eri tuotteiden välillä oli kuitenkin selvää eroja esimerkiksi kyvyssä siirtää nestemäistä vettä kapillaarisesti, eli kalsiumsilikaatti- ja valkokalkkilevyt eivät muodosta keskenään täysin yhtenäistä joukkoa.

Myös ontelolaatta- ja seinäbetonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien laboratoriokokeet nostivat esille eri betonilaatujen erilaisia ominaisuuksia ja betonin materiaaliominaisuuksien määrittämiseen liittyviä haasteita: Betonin materiaaliominaisuudet riippuvat betonimassan koostumuksesta ja valetun betonin jälkihoidosta, materiaaliominaisuudet muuttuvat ajan funktiona hydrataation edessä ja ovat voimakkaasti riippuvia koekappaleiden kosteustilasta. Tiiviillä betonilaaduilla materiaaliominaisuuksien määrittäminen voi kestää hyvin pitkään moniin muihin materiaaleihin verrattuna (tasapainokosteuden osalta jopa useita vuosia). Myös käytännössä betonirakenteiden kosteusolosuhteiden muuttuminen ja tasaantuminen kestää useita vuosia, mikä tulee ottaa huomioon rakenteiden toimivuutta arvioitaessa esimerkiksi kenttämittausten avulla.

Eri materiaaliominaisuuksien määrittämiseen liittyy kuhunkin omat erityispiirteensä ja useissa tapauksissa nykyiset standardimenetelmät eivät ota kaikkia näitä erityispiirteitä huomioon. Esimerkiksi ennen painelevykoetta tehtävän vakuumikyllästämisen onnistuminen, painelevykokeen keskeytysrajan

määrittäminen, materiaaliominaisuuksien muuttuminen ajan funktiona, tasapainokosteuskäyrän määrittäminen murskatuista koekappaleista ja toistuvan uunikuivauksen (betonin mikrohalkeilun) vaikutukset ovat esimerkkejä tekijöistä, joilla voi olla hyvin suuri vaikutus mittaustuloksiin, mutta niitä ei ole joko huomioitu mittaustandardien ohjeistuksessa tai ne on käsitelty liian yksinkertaistetulla tavalla luotettavien materiaaliominaisuusarvojen saamiseksi.

Kaikista näistä tekijöistä seuraa, että esimerkiksi laskennallisia tarkasteluja varten eri käyttötarkoitukseen tulevien ja eri ikäisten betonilaatujen kosteusteknisten ominaisuuksien valinnassa on suositeltavaa käyttää kaikkea saatavilla olevaa tietoa, jotta tulokset kuvaisivat tarkasteltavaa tapausta mahdollisimman hyvin. Jos tuote- tai tuoteryhmäkohtaisia materiaaliominaisuuksia ei ole laskennallisia tarkasteluja varten käytettävissä (kuten edelleen usein on tilanne), tulisi laskennassa tehdä herkkyystarkasteluja betonin materiaaliominaisuuksien vaihtelun vaikutusten selvittämiseksi. Lisäksi laskennallisten tarkastelujen kalibroiminen ja vertaaminen käytännön mittauksiin on suositeltavaa, koska betonin ominaisuuksien tarkka määrittäminen on todettu erittäin haastavaksi. Tarkastelujen suorittajilla tulisi olla riittävät perustiedot eri betonilaatujen kosteusominaisuuksista sekä ymmärrys hydrataation vaikutuksesta betonin kuivumiseen.

4.3 Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta

4.3.1 Lämmöneristetyypin vaikutus betonisten sisäkuorielementtien kuivumiseen

Rakennusten energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta katsottuna yksi ulkoseinärakenteita koskeva muutos on betonisandwich- ja sisäkuorielementtien mineraalivillalämmöneristykseen korvaaminen muovipohjaisilla lämmöneristeillä. Solumuovieristeiden vesihöyrynläpäisevyys on huomattavasti mineraalivillalämmöneristeitä alhaisempi, joten solumuovieristeitä käytettäessä betonirakenteinen sisäkuori kuivuu hitaammin ulkoilmaan päin. Sisäkuorielementillä tarkoitetaan tässä yhteydessä 150 mm paksua massiivista betonielementtiä, joka on lämmöneristetty ulkopuolelta ja jossa lämmöneristeen ja julkisivuverhouksen välissä on hyvin tuulettuva ilmaväli. COMBI-hankkeen yhteydessä tarkasteltiin lämmöneristetyypin vaikutusta sisäkuorielementin kuivumiskäyttäytymiseen ja pinnoittamiseen.

COMBI-hankkeessa tehtyjen laboratoriomittausten ja laskennallisten tarkastelujen perusteella mineraalivillaeristetyt kuorielementit kuivuivat kahteen suuntaan, kun taas suuren vesihöyrynvastuksen omaavan PIR-eristelevyn tapauksessa kuorielementit kuivuivat vain yhteen suuntaan. Vesihöyrynvastukseltaan näiden kahden tapauksen välissä oleva EPS-eriste tuotti näiden kahden väliltä olevat tulokset, mutta turvallisella puolella oleva arvio on olettaa myös EPS-eristetty rakenne yhteen suuntaan kuivuvaksi.

Kuorielementtibetonien ($v/s < 0,50$) kuivumisessa havaittiin nopea alkuvaihe, joka sisälsi sekä kosteuden haihtumisen kuorielementin vapaasti tuulettuvasta pintakerroksesta, että sitoutumiskuivumisen vaikutuksen. Valun jälkeen suhteellinen kosteus kuorielementtien pintaosassa laski nopeasti alle 90 % RH, mutta tämän jälkeen rakenteen kuivuminen hidastui merkittävästi. Näin ollen kosteutta hyvin kestäviä sisäpuolisia pintamateriaaleja käytettäessä pinnoittamisen raja-arvot voidaan saavuttaa hyvinkin nopeasti, mutta nopean alkuvaiheen tasoa matalammilla raja-arvoilla tulee työmaan aikataulusuunnittelussa varautua pitkiin kuivumisaikoihin.

Pinnoittamisen jälkeen ensimmäisen kahden vuoden aikana kuorielementin pintamateriaalin vesihöyrynvastuksella oli suurempi vaikutus pintamateriaalin taakse muodostuvaan suhteelliseen kosteuteen, kuin kuorielementin ulkopuolisen lämmöneristeen korkealla vesihöyrynvastuksella.

Molemmat tekijät hidastavat sisäkuorielementin kuivumista ja siten nostavat suhteellista kosteutta pinnoituksen jälkeen tasaantuneissa olosuhteissa, mutta pintamateriaalin kestävyys kannalta on tärkeämpää mahdollistaa betonirakenteen kuivuminen sisäänpäin, kuin ulospäin.

Kosteutta hyvin kestävien sisäpuolisten pintamateriaalien tapauksessa on tärkeää saavuttaa riittävän kuiva alusta tartunnan muodostumisen mahdollistamiseksi, vaikka pintamateriaalit myöhemmin kestäisivätkin korkeita suhteellisen kosteuden olosuhteita. Lisäksi tulee ottaa huomioon kosteuden poistumisesta seuraava betonin kuivumiskutistuminen. Mikäli esimerkiksi vedeneriste asennetaan mahdollisimman nopeasti rakenteen pintaosan kosteuden salliessa, rakenteen kuivumiskutistuma voi pitkällä aikavälillä aiheuttaa laatoitukseen pakkojännityksiä, jotka voivat irrottaa sen. Tähän tulee varautua riittävällä vedeneristyspaksuudella, joustavalla kiinnityslaastilla sekä oikein sijoitetuilla joustavilla laattasaumoilla.

Suosituksia kuorielementtien ulkopuolisen lämmöneristeen vesihöyrynvastuksesta (lämmöneristeen tyypistä) on koottu taulukkoon 1. Taulukon perusteella voidaan todeta, että käytettäessä vesihöyrytiivistä lämmöneristettä, tulee sisäpuolisten pintamateriaalien olla pääsääntöisesti vesihöyryavoimia. Kosteudelle herkkien pintamateriaalien tapauksessa tulee aina varmistua betonirakenteen riittävästä kuivumisesta.

Taulukko 1. COMBI-hankkeessa tehtyjen laboratoriokokeiden ja laskentatarkastelujen perusteella annetut suositukset kuorielementtien ulkopuolisen lämmöneristeen vesihöyrynvastuksen valintaan.

	Kuorielementin ulkopuolisen lämmöneristeen vesihöyrynvastus	
Ei lainkaan pintamateriaalia	Ulkopuolinen lämmöneriste voidaan valita vapaasti	
	<i>Pintamateriaali herkkä kosteudelle</i>	<i>Pintamateriaali kosteutta kestävä</i>
Pintamateriaali vesihöyryavoin	Ulkopuolinen lämmöneriste voidaan valita vapaasti, mutta suosituksena on käyttää vesihöyryavointa lämmöneristettä	Ulkopuolinen lämmöneriste voidaan valita vapaasti
Pintamateriaali vesihöyrytiivis	Ulkopuolisen lämmöneristeen tulee olla hyvin vesihöyryä läpäisevä (*)	Ulkopuolinen lämmöneriste tulisi olla vesihöyryavoin, jotta betonirakenne ei jää kahden tiiviin pinnan väliin.

(*) Riskialtis yhdistelmä. Betonirakenteen riittävä kuivuminen on varmistettava huolellisesti. Tarvittaessa kosteusjakauma määritetään syvemmältä kuin 70 mm.

Eri tavoilla eristettyjen kuorielementtien kosteusolosuhteiden käyttäytymistä ja pinnoittamista tarkasteltiin laskennallisesti ulkokuivissa olosuhteissa (ei sadetta tai säteilysuureita). Näiden perusteella suhteellinen kosteus pintamateriaalin alla asettui verrattain samankaltaiselle tasolle eri tilanteissa. Tämä tarkoittaa sitä, että pääseminen aidosti alhaisempiin suhteellisen kosteuden arvoihin edellyttää useita yhtäaikaista toimenpiteitä, kuten lyhyttä kastumisjaksoa ulko-olosuhteissa, riittävän pitkää kuivumisjaksoa, hyviä kuivumisolosuhteita sekä rakenne- ja materiaaliratkaisuja, jotka mahdollistavat rakenneosien kuivumisen tehokkaasti. Työmaan kastumisjakson, eli ulkoilman olosuhteissa vietetyn ajan lyhentäminen auttoi saavuttamaan alhaiset lopputilanteen kosteusolosuhteet tehokkaammin, kuin kuivatusjakson pidentäminen. Lisäksi vesihöyryavoimen lämmöneristeen käyttäminen tuotti hieman alhaisemmat lopputilanteen kosteusolosuhteet, kuin vesihöyrytiivin lämmöneristeen käyttäminen.

Mitä suuremman vastuksen betoni itsessään muodostaa kosteuden siirtymiselle betonirakenteen sisällä, sitä suurempia kosteuspitoisuuksia betonirakenteen sisälle voi muodostua. Tällöin rakenteen pintaosat voivat kuivua selvästi kuivemmiksi samaan aikaan, kun rakenteen sisäosissa on vielä korkeampi kosteus. Tutkittu betonilaatu kuivui pintaosastaan 25 mm syvyydeltä selkeästi kuivemmaksi kuin 75 mm syvyydeltä (rakenteen puoliväli) ja 125 mm syvyydeltä. Yhteen suuntaan kuivuissa tapauksissa syvempien mittapisteiden välillä (75 ja 125 mm) ei ollut merkittävää eroa. Nyt tehtyjä tutkimuksia paksummilla betonirakenteilla (luokkaa 400 mm) käytettäessä kosteudelle herkkää pintamateriaalia on syytä selvittää rakenteen kosteusjakauma tarpeeksi syvältä rakenteesta ennen pintamateriaalin asennusta, jotta saadaan selville koko rakenteen kosteusolosuhteet. Tällöin Betonin suhteellisen kosteuden mittausta RT-kortin ohjeistamien arviointisyvyyksien lisäksi on suositeltavaa mitata kosteus myös syvemältä kuin ohjekortissa esitetystä syvyydeltä 70 mm, esimerkiksi rakenteen keskeltä.

4.3.2 Maanvastaiset seinät

Maanvastaiset seinät ovat haastavia rakenteita lämpö- ja kosteusteknisesti, koska rakenteeseen kohdistuu useita erilaisia kosteusrasituksia yhtä aikaa useasta eri suunnasta: Rakennetta rasittaa rakennuksen ympärillä oleva viileä ja kostea maa, ulkopuolelta yläosasta sade ja ulkoilman olosuhteet sekä sisäpuolelta sisäilman kosteuslisä ulkoilmaan ja maahan nähden. Vanhoissa maanvastaisissa seinissä on esiintynyt runsaasti kosteusteknisen toiminnan puutteita, johtuen esimerkiksi puutteellisista rakenneratkaisuista ja vedeneristemateriaalien ikääntymisestä.

Maanvastaisten seinien lämmön- ja kosteudeneristys tulee lähtökohtaisesti aina sijoittaa kantavan rakenteen ulkopuolelle. Tällöin kantava rakenne ja muut keskeiset sisäilmaan vaikuttavat materiaalikerrokset jäävät lämmöneristuksen lämpimälle puolelle ja kosteudeneristuksen kuivalle puolelle. Yksi käytännönläheinen tapa rakenteiden suunnitteluvaiheessa on piirtää rakennepiirustuksissa lämmön- ja kosteudeneristyskerroksia kuvaava viiva kantavien rakenteiden ulkopuolelle ja jos tämä viiva katkeaa tai leikkaa suojattavia rakenneosia, tulisi kyseistä kohtaa arvioida tarvittavilta osin erikseen.

Vanhoja rakenteita korjattaessa ulkopuolista lämmön- ja kosteudeneristystä ei aina ole mahdollista käyttää, jolloin lämmöneristys haluttaisiin tehdä olemassa olevan rakenteen sisäpuolelle. Jos vanhassa rakenteessa esiintyy kohonneita kosteuspitoisuuden arvoja, on rakenteen kuivaaminen remontin yhteydessä ainoastaan tilapäinen ratkaisu, ellei uusi rakenneratkaisu edesauta rakenteen pysymistä kuivana pitkällä aikavälillä.

Tehtyjen laskentatarkastelujen perusteella sisäpuolisena lisälämmöneristeenä on suositeltavaa käyttää ohutta ja kapillaarista kosteutta tehokkaasti siirtävää lämmöneristettä, kuten kalsiumsilikaattilevyä tai vastaavaa. Markkinoilla olevien tuotteiden välillä esiintyy kosteusominaisuuksien vaihtelua, joten käytettävältä tuotteelta tulee varmistaa soveltuvat materiaaliominaisuudet. Kapillaarisen kosteudensiirron hyödyntämiseksi kalsiumsilikaattilevyt tulee kiinnittää alustaan vastaavat kosteudensiirto-ominaisuudet omaavalla laastilla.

Ulkopuolelta lämmöneristämättömän rakenteen tapauksessa mineraalivilla- tai solumuovieristeiden tai kevytbetoniharkkojen käyttöä rakenteen sisäpuolisena lämmöneristeenä ei suositella. Mineraalivillaeriste sallii kosteuden diffuusion sisäilmasta lämmöneristeen ja kantavan rakenteen rajapintaan, mikä synnyttää sinne haitallisen korkeat suhteellisen kosteuden olosuhteet. Verrattain vesihöyrytiivis XPS-eriste (ja sitä tiiviimmät solumuovieristeet, kuten polyuretaani) parantavat tilannetta sisäilmasta siirtyvän kosteuden suhteen, mutta heikentävät tilannetta seinän alaosassa maasta siirtyvän kosteuden suhteen. EPS-eristeen vesihöyrynläpäisevyys jää näiden kahden vaihtoehdon väliin,

mutta senkään käyttö ei ole suositeltavaa, koska se mahdollistaa kuitenkin kosteuden haitallista siirtymistä sisäilmasta lämmöneristeen taakse ja hidastaa liikaa maasta siirtyvän kosteuden kuivumista.

Rakenteen ulkopuolinen lämmön- ja kosteudeneristys mahdollisti tehokkaasti kapillaarista kosteutta siirtävien kalsiumsilikaattilevyjen lisäksi myös joidenkin muiden sisäpuolisten lisälämmöneristysvaihtoehtojen käyttämisen, kuten ohuen EPS-eristeen, heikommin kapillaarista kosteutta siirtävän kalsiumsilikaattilevyn ja kevytbetoniharkon. Olemassa olevan lämmöneristykseen vuoksi lisälämmöneristykseen taloudellinen kannattavuus on kuitenkin suositeltavaa arvioida erikseen.

Kapillaarisesti maasta rakenteisiin siirtyvä vesi heikensi huomattavasti rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja tämä on suositeltavaa ehkäistä sekä uusissa että vanhoissa rakennuksissa. Maasta vetenä siirtyvän kosteuden lisäksi jo pelkkä vesihöyryn diffuusio pystyi aiheuttamaan haitallisen korkeat suhteellisen kosteuden olosuhteet vesihöyrytiiviiden sisäpuolisten lisälämmöneristeiden taakse. Vanhoissa rakenteissa maasta kapillaarisesti ja diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirta tulee pyrkiä katkaisemaan anturan ja perusmuurin väliin sijoitettavalla kosteussulkukerroksella (esimerkiksi injektoinnilla). Myös uudisrakentamisessa anturan ja perusmuurin väliin on suositeltavaa sijoittaa lisäksi kosteussulkukerros (bitumikermi tai vastaava), joka antaa lisävarmuutta esimerkiksi tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvia tilankäytön muutoksia tai salaojien toimivuuden puutteita varten. Maanvastaisen laatan reuna-alueille asennettavaa bitumikermiä voidaan käyttää myös rakennuksen radonsuojauksessa (RT 81-11099).

Tavanomaisten rakenne- ja liitosratkaisujen lisäksi on tärkeää muistaa tarkistaa ja suunnitella myös erilaiset erikoistilanteet, kuten maanpinnan alapuolisissa kerroksissa olevat märkätilat, eri tyyppisten tilojen rakenteiden liitokset, ympäröivien vesistöjen ja pohjaveden pinnan alapuolella olevat rakenteet ja sisäpuoliset kuivatusratkaisut, sisältäen myös tarvittavat rakenteiden ja tilojen tuuletus- ja ilmanvaihtoratkaisut. Myös rakenteiden suunnitelmienmukaisuuden varmistaminen rakennusvaiheessa sekä toimivuuden seuranta ja tarvittaessa korjaaminen ovat keskeisiä rakenteiden kosteusteknistä toimintaa parantavia tekijöitä.

4.3.3 Puhalluseristetyt yläpohjat

Yläpohjien avohuokoisissa lämmöneristeissä tapahtuva sisäinen konvektio tarkoittaa tilannetta, jossa lämmöneristeen huokosissa oleva lämmin ilma nousee tiheyserojen vaikutuksesta ylöspäin ja kylmä ilma painuu alaspäin, käynnistäen näin ilman liikkeen lämmöneristekerroksen sisällä. Sisäinen konvektio kasvattaa lämmöneristekerroksen läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä verrattuna lämmöneristemateriaalin lämmönjohtavuuden mukaiseen lämpöhäviöön ja muuttaa myös rakenteen lämpötila- ja kosteusolosuhteita. Lämmöneristekerroksessa tapahtuvan sisäisen konvektion riski koskee avohuokoisia lämmöneristeitä ja niistä erityisesti suuremman ilmanläpäisevyyden omaavia puhalluseristeitä levyeristeisiin verrattuna. Lämmön- ja aineensiirron teorian perusteella lämmöneristekerroksen paksuntaminen lisää riskiä sisäiselle konvektiolle, mutta tarkka määrä riippuu useista eri tekijöistä.

Yläpohjien laboratoriokokeiden tulokset osoittavat, että kevyissä ja hyvin ilmaa läpäisevissä avohuokoisissa lämmöneristeissä sisäisen konvektion aiheuttama lisäys rakenteen läpi tapahtuvaan lämpövirtaan voi olla merkittävä jo 20 °C lämpötilaerolla ja se tulisi ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa. Suurin tarve sisäisen konvektion huomioon ottamiselle on hyvin ilmaa läpäisevillä puhalluslasivillaeristeillä, joilla sisäinen konvektio lisäsi yläpohjarakenteen läpi siirtyvää lämpövirtaa keskimäärin 30–40 % lämpötilaerosta riippuen.

Puukuitueristeen asennus puhaltamalla vähentää puolestaan sisäistä konvektiota merkittävästi verrattuna käsin tehtyyn asennukseen. Puhalletussa puukuitueristekerroksessa sisäisen konvektion aiheuttama lisäys lämpövirtaan on keskimäärin 0–10 %. Asennustapojen väliset erot korostavat myös asennustyön huolellisuutta, käytetystä menetelmästä riippumatta.

Yläpohjan yli vallitsevan lämpötilaeron kasvaessa sisäinen konvektio lisääntyi sekä lasivilla- että puukuitueristeisessä yläpohjassa. Lämmöneristekerroksen paksuudella ei sen sijaan ollut nyt tehdyissä mittauksissa merkittävää vaikutusta sisäisen konvektion määrään.

Ilmaa läpäisevämmällä puhalluslasivillalla ilman virtausnopeuden lisäys lämmöneristeen yläpinnalla lisäsi eristekerroksen sisäistä konvektiota merkittävästi. Puukuitueristeisessä yläpohjassa vastaavaa ilmiötä ei havaittu. Lämmöneristekerroksen pinnan lähellä esiintyviä korkeita ilman virtausnopeuksia tuleekin välttää varsinkin hyvin ilmaa läpäisevää lämmöneristettä käytettäessä. Tämä saadaan aikaan esimerkiksi tuulenojaimia käyttämällä (rakenteen tuulettuvuus kuitenkin varmistaen). Vaihtoehtoisesti suurempien virtausnopeuksien yhteydessä tulisi käyttää pienemmän ilmanläpäisevyyden omaavia tuotteita.

4.3.4 Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen

Betonirakenteiden kosteusolosuhteiden tunteminen ja hallinta rakennusten työmaavaiheessa ovat tärkeitä laadukkaan rakentamisen osatekijöitä. Betonirakenteiden hallittu kuivuminen edesauttaa betonin haluttujen materiaaliominaisuuksien saavuttamista ja riittävä kuivuminen on ehtona esimerkiksi pintamateriaalien kestävyydelle. Kuivumiseen liittyvien epävarmuustekijöiden ja toisaalta työma-aikataulujen lyhentämisspaineiden vuoksi betonin kuivumisen seuranta tehdään työmaolosuhteissa erilaisten suhteellisen kosteuden mittausten avulla. Yhtenä näiden mittausten onnistumisen ehtona on tuntee mittalaitteisiin ja -järjestelyihin liittyvät virhelähteet ja pystyä arvioimaan niiden vaikutusta johtopäätöksiin rakenteiden kuivumisesta. Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen on hyvä esimerkki mittauksesta, jossa tulosten tulkinta on huomattavasti vaikeampaa verrattuna mittauksen tekniseen suorittamiseen.

Suhteellisen kosteuden mittaamiseen käytetään nykyisin tyypillisesti kapasitiivisia RH-antureita. Betonirakenteiden kuivumiskokeiden yhteydessä tehtyjen anturivertailujen perusteella muun muassa anturin malli, suojuksen materiaali ja asennustapa vaikuttavat merkittävästi mittaustuloksiin. Eri antureilla voi olla erilainen tarkkuus ja hajonta erityisesti silloin, kun mittauksia tehdään kosteasta betonista, jonka suhteellinen kosteus on yli 90 % RH. Yksittäiset anturit saattoivat esimerkiksi nousta näyttämään arvoa 100 % RH ilman tuloksen muuttumista, vaikka samasta tilanteesta testattavat muut anturit olisivatkin näyttäneet suhteellisen kosteuden hidasta laskua. Samoin hetkelliset lämpötilan nousun piikit aiheuttivat samanlaisista koekappaleista mitattuina toisistaan poikkeavan kestoisia ja suuruksia suhteellisen kosteuden arvonnousuja. Tämä lisää betonin suhteellisen kosteuden mittausten haastavuutta tehtäessä mittauksia muuttuvissa ulko-olosuhteissa tasaisempien sisäolosuhteiden sijaan. Muuttuvissa lämpötilaolosuhteissa tai hyvää mittaustarkkuutta tavoiteltaessa on suositeltavaa käyttää näytepalamittausta (RT 14-10984). Yleisesti ottaen mittauksia suorittavilta ja tuloksia tulkitsevilta henkilöiltä tulee edellyttää hyvää aihepiiriin osaamista, koska poikkeamat käytettävissä mittalaitteissa ja mittausten menetelmissä voivat aiheuttaa merkittäviä virheitä mittaustuloksiin ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin.

Kovettuneesta betonista jälkikäteen tehdyn porareikämittauksen ja tuoreeseen betonivaluun asennetuista putkista tehtyjen mittausten tulosten välillä oli yleensä systemaattista eroa, vaikka porareikämittauksia tehtiinkin vähemmän kuin valuun asennetuista putkista tehtyjä mittauksia. Pienimmät erot saatiin silloin,

kun putki- ja porareikämittauksissa käytettiin samaa anturi- ja suodatintyyppiä. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että kapasitiivisilla kosteusantureilla tehdyt pitkäkestoiset putkimittaukset ovat epäluotettavampia kuin lyhytkestoiset porareikämittaukset. Putkimittauksen luotettavuus heikkenee varsinkin silloin, kun betonin suhteellinen kosteus on yli 90 % RH. Putkimittauksessa anturien luotettavuus ja soveltuvuus mittaukseen on syytä tarkistaa etukäteen erillisellä testimittauksella, koska eri anturityyppien välillä esiintyy tässä suhteessa merkittäviä eroja. Putkimittauksessa mittauksen epävarmuus on myös arvioitava tapauskohtaisesti erikseen.

Antureiden suodinmateriaaleista teflonsuodin (PTFE-muovi) antoi polyeteenisuodinta (PE-muovi) johdonmukaisempia tuloksia ja on nyt saatujen tulosten perusteella suositeltu vaihtoehto tuoreen betonin kuivumisen seurantamittauksiin.

5 Talotekniikka ja teknisten ratkaisujen kustannustehokkuus

5.1 Rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien kustannusoptimaalisuus

Lämpöpumppujärjestelmät osoittautuivat tutkituista vaihtoehdoista kustannustehokkaimmiksi päälämmitysjärjestelmiksi palvelurakennuksissa kiinteistön omistajan näkökulmasta. Kustannustehokkaimpia ratkaisuja tutkituissa uudiskohteissa olivat sähköisellä apulämmityksellä varustettu maalämpöpumppu ja saneerauskohteessa sähköisellä apulämmityksellä varustettu ilma-vesilämpöpumppu. Lämpöpumppujen tehomitoitukseen, älykkääseen ohjaukseen ja varaajien riittävään mitoitukseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota lämpöpumppuratkaisuja suunniteltaessa, koska niillä voidaan vähentää lämpöpumppujen käyttökustannuksen kasvua, mikäli esimerkiksi sähkön tehomaksut nousisivat merkittävästi tulevaisuudessa.

Suosittelavia investointeja kaikissa tutkittujen uudiskohteiden kustannusoptimaalisissa suunnitteluratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:

- Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
- Ilmanvaihdon tarpeenmukainen ohjaus ja erillispoistojen lämmöntalteenotto
- Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen
- Energiatehokkaiden ikkunoiden asentaminen

Elinkaarikustannusten näkökulmasta katsottuna uudiskohteiden vaipan lämmöneristäminen rakentamismääräysten vertailutasoa paremmaksi ei ole perusteltua. Jos uudiskohteen energiankulutusta pyritään kuitenkin vielä pienentämään elinkaarikustannuksiltaan edullisinta tasoa pienemmäksi, kustannustehokkainta olisi maalämpöpumpulla lämmitetyssä kohteessa investoida ensin energiatehokkaampaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja kasvattaa edelleen omaa aurinkosähkön tuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi edelleen kasvattaa aurinkolämmön tuotantoa ja parantaa vaipan lämmöneristystasoa. Vastaavasti kaukolämmitetyssä kohteessa kannattaisi ensin investoida energiatehokkaampaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja sen jälkeen kasvattaa edelleen omaa aurinkosähkön- sekä lämmöntuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi parantaa vaipan lämmöneristystasoa vertailutasoa paremmaksi.

Suosittelavia investointeja kaikissa tutkitun saneerauskohteen kustannusoptimaalisissa suunnitteluratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:

- Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
- Yläpohjan lisälämmöneristäminen
- Vanhojen ikkunoiden korvaaminen uusilla energiatehokkailla ikkunoilla
- Lämmöntalteenotolla varustetun koneellisen tulo- ja poisto IV-järjestelmän asentaminen koneellisen poisto IV-järjestelmän tilalle
- Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen

Mikäli saneerauskohteen lämmitys toteutettaisiin ilma-vesilämpöpumpulla, energiankulusta kannattaisi lähteä edelleen pienentämään elinkaarikustannuksiltaan edullisinta tasoa paremmaksi ensin kasvattamalla aurinkosähkön tuotantoa, asentamalla aikaisempaa energiatehokkaammat ikkunat ja lisäämällä yläpohjan lämmöneristystasoa. Vastaavasti kaukolämmitetyssä kohteessa kannattaisi ensin

kasvattaa aurinkolämmöntuotantoa sekä parantaa yläpohjan lämmöneristystasoa ja vasta sitten kasvattaa edelleen aurinkosähkön tuotantoa.

Aurinkosähköjärjestelmän asentaminen on taloudellisesti kannattavinta palvelurakennuksissa, jotka ovat ympäri vuoden käytössä. Erityisesti aurinkopaneelien vaatima suuri kattopinta-ala kannattaa ottaa huomioon jo uusien palvelurakennusten suunnitteluvaiheessa. Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa on syytä ottaa huomioon koko kiinteistön sähkönkulutus, sen sijaan, että otettaisiin huomioon vain rakennuksen sisätiloissa toteutuva sähkönkulutus.

5.2 Uusiutuvan energian etätuotanto

5.2.1 Sähkön ja lämmön etätuotantoon liittyvä lainsäädäntö

Rakennusten energiatehokkuussäätelyn lisäksi energian etätuotantoon liittyy moninainen joukko säätelyinstrumentteja, kuten verokohtelu tai verkonhaltijan rooli, ja ne sääntelevät sähköä ja lämpöä eri tavoin. Sähköenergian säätely on laajempaa ja yksityiskohtaisempaa kuin lämmön säätely etenkin markkinasäätelyn kannalta ja erityisesti EU-tason säätelyssä.

Uusiutuvan sähköenergian keskitetyn pienimuotoisen etätuotannon taloudellisen kannattavuuden kolme keskeistä komponenttia ovat E-luvun soveltamisen taseraja, etätuotannon arvonnäköverokohtelu sekä valmistevero ja huoltovarmuusmaksu. Lämpöenergian kohdalla taseraja on merkityksellinen. Arvonnäköverokohtelu, valmistevero ja huoltovarmuusmaksu vaikuttavat suoraan etänä tuotetun uusiutuvan sähköenergian hintaan ja siten kilpailukykyyn suhteessa verkosta ostettavaan sähköön.

Nykyhetken säätely on nähtävä ainoastaan alkuvaiheena laajemmassa siirtymässä. Tulevaisuudessa sähkön ja lämmön energiatehokkuussäätely on liikkumassa EU-tasolla yksityiskohtaisempaan ja pidemmälle menevään säätelyyn. Tämän tutkimuksen perusteella näyttää siltä, ettei tämän siirtymän laajuutta ja merkitystä ole vielä Suomessa säätelyn tasolla huomioitu.

5.2.2 Uusiutuvan energian etätuotannon taloudellinen kannattavuus

Tehty analyysi osoitti, että paikallisen tuotannon ja etäämpänä keskitetysti tuotetun oman tuotannon kannattavuus vaihtelee teknologia- ja sovelluskohtaisesti.

Tuulivoiman osalta analyysi osoitti, että korvamerkityn keskitetyn tuulienergian hyödyntäminen osana rakennusten omaa energiantuotantoa olisi edullinen tapa toteuttaa omaa uusiutuvaa tuotantoa siirrosta aiheutuvista kustannuksista huolimatta. Toisaalta keskitetty aurinkosähkötuotanto on siirtomaksujen vuoksi tyypillisesti vähemmän kannattava ratkaisu kuin oma paikallinen aurinkosähkötuotanto. Paikallisissa tuotantokustannuksissa ei myöskään päästä niin alas, että paikallisesti tuotetun sähkön siirtäminen siirtoverkon kautta eri kiinteistöjen välillä olisi loppukäyttäjälle kannattavaa. Niinpä paneelien mitoitus asennuskohteen mukaan tulisi olla useitakin kiinteistöjä omistavan loppukäyttäjän ensisijainen tavoite.

Kun tarkastellaan energiajärjestelmän kokonaistehokkuutta ja -taloudellisuutta, työpaketin analyysi osoittaa, että kansallista lainsäädäntöä (2018) olisi suotavaa kehittää sellaiseen suuntaan, että systeemitason tehokkuus toteutuisi nykyistä paremmin. Erityisesti paikallisesti vaadittavaan uusiutuvan tuotantoon liittyvät rajoitteet ovat systeemin edun vastaisia. Suomessa olisi systeemin näkökulmasta tehokkaampaa, että erillisiin kiinteistöihin rakennettavien uusiutuvan sähköntuotannon ratkaisujen sijaan vastaavat taloudelliset panostukset keskitettäisiin suuriin tuulivoimalaitoksiin esimerkiksi korvamerkittyjen omistusosuuksien kautta. Tällöin samalla taloudellisella panoksella saataisiin selvästi enemmän uusiutuvaa tuotantoa.

5.3 Valaistuksen energiatehokkuus

Valo ja valaistus on yksi keskeinen rakennusten käytettävyyteen ja ihmisten hyvinvointiin vaikuttava tekijä. Näkeminen edellyttää riittävää valoa joko luonnonvalon tai keinovalon muodossa, mutta epätasaiset valaistusolosuhteet voivat aiheuttaa myös häikäisyä tai hahmottamisvaikeuksia. Luonnonvalon hyödyntämisellä voidaan tavoitella keinovalon käytön vähentämistä, mutta hyödyntämismahdollisuudet riippuvat esimerkiksi tilajärjestelyistä ja saatavilla olevan auringonvalon määrästä. Puutteelliset varjostus- tai verhoratkaisut voivat myös kasvattaa rakennuksen jäähdytystarvetta ja aiheuttaa yksityisyysongelmia, joskin esimerkiksi koulujen ja päiväkotien tapauksessa tästä aiheutuva haitta on pienempi kuin asuinrakennuksissa. Uusissa palvelurakennuksissa käytetään pääsääntöisesti energiatehokkaita valaisimia, mutta niiden sijoittelua ja valaistuksen ohjausta olisi mahdollista vielä kehittää.

Nyt tehdyissä palvelurakennusten tarkasteluissa valaistuksen energiankulutus oli melko pieni verrattuna tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen energiankulutukseen. Tällöin koko rakennuksen energiankulutuksen näkökulmasta katsottuna keinovalaistus on suositeltavaa suunnitella ensisijaisesti rakennuksen käytettävyyden ja viihtyvyyden näkökulmasta ja vasta tämän jälkeen rakennuksen energiankulutuksen pienentämisen näkökulmasta.

Valaistusjärjestelmän sähkönkäytön näkökulmasta katsottuna energiatehokkain ratkaisu oli työpistekohtainen valaistus, jossa tarvittava määrä valoa kohdistetaan vain verrattain tarkasti määritellylle alueelle. Tavanomaisen yleisvalaistuksen energiankulutusta oli kuitenkin mahdollista pienentää selvästi myös käyttämällä perinteisen päälle-pois-ohjauksen sijaan kehittyneempiä valaistuksen ohjaustekniikoita, kuten tilanneohjauksia tai läsnäolo- ja päivänvalo-ohjausta.

5.4 Rakennusautomaatiojärjestelmät

Rakennusautomaatiojärjestelmällä tarkoitetaan yksittäistä rakennusta koskevaa, automatisoitua mittaus- ja ohjausjärjestelmää, johon voi olla kytkettynä monia rakennuksen taloteknisiä järjestelmiä, kuten lämmitys- ja jäähdytys, valaistus, ilmanvaihto, kulunvalvonta sekä erilaiset erillismittaukset. Ideaalisessa tilanteessa rakennusautomaatiojärjestelmät mahdollistavat eri tavoitteiden entistä tarkemman seurannan ja vähentävät siten paikan päällä käymisen tarvetta, optimoivat järjestelmiä automaattisesti asetettujen tavoitteiden mukaisesti pienentäen näin energiankulutusta ja hälyttäen tarvittaessa erilaisista toimivuuspuutteista.

COMBI-hankkeessa tarkastellun kuuden uuden koulu- ja päiväkotirakennuksen automaatiojärjestelmät olivat nykyaikaisia ja monella tapaa kattavia järjestelmiä, joiden käyttö onnistuu etäkäytön avulla. Järjestelmien keskeinen kehitystarve liittyi kuitenkin siihen, että järjestelmiin ei aina oltu liitetty kaikkia keskeisiä apulaitteita. Tällöin esimerkiksi lattialämmityksen säätäminen tapahtui huonekohtaisten olosuhdemittausten avulla, mutta mittauksesta ja säädöistä kertyvää dataa ei siirtynyt rakennusautomaatiojärjestelmään, jolloin se ei myöskään tallentunut tai ollut käytettävissä myöhemmää hyödyntämistä varten. Näin huoneolosuhteiden ja lattialämmityksen säätöjen dataa ei ole mahdollista esimerkiksi verrata huoneolosuhteiden tavoitearvoihin tai hyödyntää muiden järjestelmien ohjauksessa, kuten tilojen jäähdytyksen. Näin ollen haluttaessa laajemmin hyödyntää rakennusautomaatiota esimerkiksi lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon ohjaukseen, tulee eri järjestelmät liittää entistä laajemmin rakennusautomaatiojärjestelmään ja niistä saatavaa tietoa kerätä talteen. Mittausdata itsessään on usein arvokasta ja hyödynnettävissä pitkänkin ajan kuluttua.

Mittausdatan keräämisen lisäksi talotekniset järjestelmät sekä niiden mittaus- ja säätöjärjestelmät tulisi suunnitella ja toteuttaa sellaisina osakokonaisuuksina, että ne tukevat tarpeenmukaisen ja vaihtelevan

käytön seuranta ja järjestelmien energiatehokasta käyttöä. Tilojen vyöhykkeistäminen eri suunnittelualojen yhteistyönä käyttötarpeiden mukaan tukee taloteknisten järjestelmien tarpeenmukaista käyttöä ja näin parantaa rakennusten energiatehokkuutta. Tämä tarkoittaa esimerkiksi koulujen iltakäytön huomioon ottamista arkkitehtuurin ja talotekniikan avulla siten, että rakennuksessa on ensinnäkin mielekästä järjestää muuta toimintaa päivisin tapahtuvan opetuksen lisäksi, mutta toisekseen myös taloteknisten järjestelmien ohjattavuutta siten, että iltakäytön edellyttämät ilmanvaihto-, valaistus- ja lämmitysjärjestelmät ovat päällä vain iltakäytön kohteena olevissa tiloissa.

Kehittyneiden menetelmien käyttöönottoaminen edellyttää automaatiolle ja mittauksille asetettavien tavoitteiden entistä tarkempaa määrittelyä entistä aikaisemmassa vaiheessa. Siksi on suositeltavaa hyödyntää suunnittelun alkuvaiheesta lähtien automaatio suunnittelijan osaamista, mutta yhteistyön mahdollistamiseksi ja sujuvoittamiseksi myös hankkeen muiden osapuolten tulisi ylläpitää ja kehittää osaamistaan automaatiojärjestelmiin liittyen.

6 Sisäilman olosuhteet ja toteutunut energiankulutus

6.1 Sisäilman olosuhteet

6.1.1 Yleistä

Sisäilman olosuhteet rakennuksissa muodostuvat useista eri tekijöistä, joista COMBI-tutkimushankkeessa on tutkittu sisäilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta, hiilidioksidi- ja radonpitoisuutta, ilmanpaine-eroa rakennuksen ulkovaipan yli ja rakennuksen ilmatiiviyttä. Näiden lisäksi sisäilman ja laajemmin sisäympäristön olosuhteisiin vaikuttavat esimerkiksi rakennusmateriaaleista, kalusteista ja käyttäjistä tulevat erilaiset kemialliset yhdisteet, sisätilojen ääniympäristö, valaistus- ja näkemisolosuhteet, pintojen lämpötila, ilmavirtausten nopeus ja sisätilojen puhtaus. Näiden ympäristötekijöiden toteutuneet arvot vaihtelevat kohteittain ja eri käyttäjät reagoivat niihin eri tavoin.

Koska COMBI-hankkeen tavoitteena on ollut tutkia asioita erityisesti energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta, on tutkimuksiin pyritty valitsemaan niitä keskeisiä suureita, jotka liittyvät erityisesti rakennusten energiankulutukseen esimerkiksi lämpöolosuhteiden ja ilmanvaihdon kautta. Mittauksia tehtiin yhteensä 12 uudiskohteesta ja 12 korjauskohteesta, eli yhteensä 24 kohteesta.

6.1.2 Sisäilman lämpötila

Sisäilman lämpötilan osalta kaksi uudiskohdetta kuuluivat sisäilmastoluokkaan S2 ja muut mitatut uudis- ja korjauskohteet (22/24) sisäilmastoluokkaan S3. Käyttötuntien osuutena mitattuna sekä uudis- että korjauskohteiden osalta tavanomaisempaa oli sisälämpötilan alarajan alittuminen, verrattuna ylärajan ylittymiseen. Toisaalta vain muutamassa kohteessa lämpötilarajojen ylityksiä ja alituksia oli suuruusluokaltaan yhtä paljon, eli pääsääntöisesti yksittäisissä rakennuksissa oli joko luokituksen alarajaa enemmän liian kylmiä tai ylärajaa enemmän kuumia ajanhetkiä, mutta harvoin molempia. Näin ollen Sisäilmastoluokituksen raja-arvojen täyttymisen näkökulmasta katsottuna uudis- ja korjauskohteet olivat yllättävänkin samankaltaisia, ottaen huomioon useat rakenne-, talotekniset- ja arkkitehtoniset erot uudis- ja korjauskohteiden välillä.

Raja-arvojen alituksia ja ylityksiä tapahtui siitä huolimatta, että kaikissa kohteissa oli koneellinen ilmanvaihto. Näin ollen olosuhteet olisivat sinänsä olleet hallittavissa teknisillä järjestelmillä. Tilojen jäähdytyksen olemassaoloa selvitettiin rakennuksen dokumentaatiosta, mutta käytettävissä olleiden toteutussuunnitelmien, työselitysten, ilmanvaihdon laiteluetteloiden ja energiatodistusten perusteella asiasta ei tämän raportin kirjoittamishetkellä ollut tarkkoja määriä käytettävissä. Otoksessa tiedetään olleen kuitenkin mukana sekä jäähdyttämättömiä tiloja, että vähintään yksittäisiä jäähdytettyjä tiloja.

Yksi mahdollinen selitys tälle on, että yksittäiseenkin rakennukseen liittyy niin suuri määrä muuttujia, että laatutasoerojen tarkoituksellinen luominen lämpötilaolosuhteisiin on hyvin vaikeaa. Vaikka rakennusten toimivuuteen vaikuttaakin tiettyjä ennustettavissa olevia ilmiöitä, näiden vaikutukset pienenevät huomattavasti tai häviävät muuttujien ja niiden keskinäisten riippuvuuksien lukumäärän kasvaessa. Tätä selitystä tukee myös energiankulutuksen suuri vaihtelu rakennuksen iästä riippumatta (ks. myöhemmät luvut). Uudis- ja korjauskohteiden luokitusten samankaltaisuudesta huolimatta toisissa rakennuksissa esiintyi ensisijaisesti liian kylmiä ja toisissa ensisijaisesti liian kuumia olosuhteita, joten erojen syntyminen myös samantyyppisten rakennusten välille on mahdollista. Eri tekijöiden vaikutuksia on tarkasteltu laskennallisesti rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiankulutuksen osalta ikkunasuunnittelua ja aurinkosuojausta käsittelevässä luvussa.

6.1.3 Kosteuslisä ulkoilmaan nähden

Sisäilman kosteuslisän pitkäaikainen keskiarvo suhteessa ulkoilmaan oli tutkituissa kouluissa ja päiväkodeissa pieni. Sisäilman kosteuslisän keskiarvo ulkoilmaan nähden oli eri mittauspisteissä talvikaudella ($T_e \leq 5\text{ °C}$) pääosin välillä $-0,8...1,2\text{ g/m}^3$ ja kesällä ($T_e \geq 15\text{ °C}$) välillä $-1,7...0,7\text{ g/m}^3$. Nämä arvot on laskettu kaikkien vuorokauden tuntien perusteella.

Kosteuslisän määrässä esiintyi ajallista vaihtelua rakennuksen käytön ja vuodenajan mukaan, mutta vaihtelun määrä pysyi pääosin maltillisena (keskihajonta usein noin 1 g/m^3). Tuloksissa esiintyi asuinrakennuksissa tehtyihin mittauksiin verrattuna huomattavan paljon myös kosteusvajeen ajanhetkiä. Eri mittauspisteiden välillä esiintynyt vaihtelu huomioon ottaen, sisäilman kosteuslisälle kouluissa ja päiväkodeissa voi tämän tutkimuksen perusteella käyttää RIL 107-2012, kosteusluokan 3 mukaista sisäilman kosteuslisää (kosteuslisä talvella 3 g/m^3 ja kesällä 1 g/m^3).

6.1.4 Hiilidioksidipitoisuus

Sisäilman hiilidioksidipitoisuus on yksi Sisäilmastoluokituksessa (RT 07-11299) käytettävistä suureista. Luokituksessa hiilidioksidipitoisuudesta tarkastellaan yhden tunnin liukuvan keskiarvon tavoitearvoissa pysymisen osuutta, käyttötuntien perusteella laskettuna. Nyt tehdyissä mittauksissa hiilidioksidipitoisuuden mittausväliksi asetettiin hankkeen alussa yksi tunti, mutta tämä on todennäköisesti ollut liian pitkä aikaväli olosuhteita tarkasti kuvaavan datan keräämiseksi. Esimerkiksi kouluissa oppitunnit ovat tyypillisesti 45 minuuttia, jonka jälkeen luokka tyhjenee kokonaan tai lähes kokonaan. Hiilidioksidipitoisuus voi tämän jaksotuksen puitteissa vaihdella niin paljon, että yhden tunnin mittausväli ei anna suureen käyttäytymisestä tarkkaa kuvaa. Hiilidioksidipitoisuuden mittaus tulee tehdä riittävän tiheällä aikavälillä ja selvittää sopiva arvo tarvittaessa testausjaksolla ennen varsinaisia mittauksia.

Hiilidioksidipitoisuudessa esiintyi kaikissa mittauskohteissa selvä viikkorytmi siten, että pitoisuus oli korkeimmillaan arkipäivisin ja matalimmillaan (lähellä ulkoilman pitoisuutta) öisin ja viikonloppuisin. Toinen jaksotus muodostui koulujen ja päiväkotien vuorokausitaulujen mukaan. Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvon osalta eri pitoisuuden käyttäytyminen peräkkäisinä päivinä ja viikkoina oli usein verrattain samanlaista, mutta vaihtelu oli suurempaa eri mittauspisteiden välillä. Tilakohtaiset erot on suositeltavaa ottaa huomioon ilmanvaihdon suunnittelussa.

Osassa kohteista mittausdatassa näkyi hiilidioksidipitoisuuden nousua öisin ja viikonloppuisin. Yöaikaisen pitoisuuden nousun syy ei selvinnyt nyt tehtyjen tutkimusten puitteissa, mutta sitä ei myöskään saatu yksilöityä mittalaitteiden tai -järjestelyjen toimivuudesta johtuvaksi. Yksi mahdollinen selitys yöaikaiselle nousulle on, että rakennuksessa on ollut muissa tiloissa sellaista käyttöä, jonka synnyttämä hiilidioksidi on kulkeutunut mitattuun tilaan. Seuraavana aamuna mitatun tilan pitoisuus on taas laskenut matalalle tasolle ilmanvaihdon käynnistyessä.

Mitatuissa kohteissa oli mukana myös kaksi vanhainkohtia. Näissä kohteissa hiilidioksidipitoisuuden käyttäytyminen poikkesi selvästi otoksen pääosan muodostaneista koulu- ja päiväkotirakennuksista, korostaen eroja eri käyttötarkoituksessa olevien rakennusten välillä.

Tunnittain tehtyjen mittausten perusteella käyttötuntien vuorokausikeskiarvojen 50 % persentiili oli pääosin 450—650 ppm välillä, kun taas vuorokausimaksimien vastaava luku oli 500—800 ppm.

6.1.5 Paine-ero ulkovaipan yli

Yleistä paine-eroista ja niiden vaikutuksista

Rakennusten paine-erojen muodostumisesta, suuruudesta, vaikutuksista ja raja-arvoista käytiin COMBI-hankkeen puitteissa runsaasti keskusteluja ja asia herätti laajaa mielenkiintoa. Koska paine-erojen hallinnalla on kasvava merkitys rakennusten suunnittelussa ja ylläpidossa, on seuraavassa esitetty joukko periaatteita paine-erojen hallintaa varten, joiden toivotaan jäsentävän ja edistävän paine-eroista käytävää keskustelua.

Ilmanpaine-ero ulkovaipan yli muodostuu yleisesti ottaen kolmesta osatekijästä, jotka ovat lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä, tuuli ja koneellinen ilmanvaihto. Näille kullekin on rakennusfysiikan ja talotekniikan peruskirjallisuudessa esitetty laskentamenetelmänsä, mutta käytännössä lähtötietojen puutteet synnyttävät merkittävän virhelähteen erilaisiin laskettuihin arvoihin verrattuna. Esimerkiksi paikallisia tuulisuus- ja lämpötilaolosuhteita, rakennuksen vaipan ilmapuotoreittejä, ilmanvaihtojärjestelmässä vallitsevia paine-eroja tai vaipan läpi tulevan korvausilman määrää ei yleensä tunneta yksityiskohtaisesti. Jatkuvasti muuttuvien olosuhteiden ja puutteellisesti tunnettujen lähtötietojen vuoksi paine-erojen määrittäminen tarkasti on laskennallisesti hyvin epävarmaa ja toisaalta paine-erojen mittausjärjestelyistä ja tulosten tulkinnasta on puuttunut riittävän yksityiskohtainen kansallinen ohjeistus.

Suomessa on pitkään ollut tapana säätää koneellisen tulo-poisto-ilmanvaihtojärjestelmän osalta poistoilmavirta hieman tuloilmavirtaa suuremmaksi, jolloin rakennuksen sisälle saadaan pieni alipaine. Lähtökohtainen oletus on ollut, että rakennusten käytön seurauksena niiden sisäilmaan muodostuu kosteuslisä ulkoilmaan nähden, ja kostean sisäilman vuotamista rakenteisiin ylipaineen vaikutuksesta on pyritty estämään suuremmalla poistoilmavirralla. Korkeissa rakennuksissa, pakkaskaudella tai tuulisella säällä rakennusten yläosissa esiintyy kuitenkin myös ylipainetta ulkoilmaan nähden.

Rakennuksen ilmatiiviyden paraneminen vaikuttaa myös paine-erojen muodostumiseen, sillä koneellisen tulo-poisto-ilmanvaihdon korvausilmavirran pysyessä vakiona, kasvaa paine-ero ulkovaipan yli rakennuksen ilmatiiviyden parantuessa. Jotta suuret paine-erot eivät aiheuttaisi vaipan hyvän ilmatiiviyden ja suurten tulo- ja poistoilmavirtojen tapauksessa suuria paikallisia vuotokohtia rakennuksen vaippaan, tulee koneellisen ilmanvaihdon ilmavirrat säätää aikaisempaa tarkemmin tasapainoon.

Vesihöyryn lisäksi ilmavirtaukset pystyvät kuljettamaan mukanaan myös muita aineita. Pitkäkestoiset alipaineolosuhteet altistavat sisäilman korvausilmavirtausten mukana tuleville epäpuhtauksille. COMBI-hankkeessa ja myös aikaisemmissa tutkimuksissa saatujen tutkimustulosten mukaan maanvastaisten rakenteet ovat yksi keskeinen kosteus- ja mikrobivaurioita sisältävä rakenneosakokonaisuus, joka samalla on alttiina alipaineen aiheuttamien korvausilmavirtojen vaikutuksille. Maanvastaisten rakenteiden lisäksi myös maaperä itsessään sisältää erilaisia epäpuhtauksia, kasvattaen riskiä maanvastaisten rakenteiden kautta tulevien ilmavuotojen haitallisille vaikutuksille. Liiallisen yli- tai alipaineisuuden synnyttämien korvausilmavirtojen haitallisten vaikutusten välttämiseksi myös rakentamismääräyksiä on muutettu sisältämään selkeämmin molemmat näkökulmat.

Periaatteellisella tasolla ylipaineen aiheuttamien ilmavuotojen riskit rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle voidaan ehkäistä kolmella eri tavalla:

- a. Ilmanpaine-eroa ulkovaipan yli ei ole tai rakennus on ulkoilmaan nähden alipaineinen
- b. Rakennuksessa on ulkoilmaan nähden ylipainetta, mutta sisäilmassa ei ole kosteuslisää ulkoilmaan nähden tai
- c. Rakennuksessa on ylipainetta ulkoilmaan nähden ja sen seurauksena kulkeutuu sisäilmasta lisäkosteutta rakenteisiin, mutta rakenteet on suunniteltu ja toteutettu siten, että ne kestävät niihin muodostuvat lämpö- ja kosteusolosuhteet vaurioitumatta.

Vastaavasti alipaineen aiheuttamien ilmavuotojen riskit sisäilman laadulle voidaan periaatteellisella tasolla estää vastaavasti kolmella eri tavalla:

- a. Ilmanpaine-eroa ulkovaipan yli ei ole tai rakennus on ulkoilmaan nähden ylipaineinen
- b. Rakennuksessa on ulkoilmaan nähden alipainetta, mutta ilmavuotoreittien varrella (rakenteissa ja/tai maassa) ei ole epäpuhtauksia ulkoilmaan nähden tai
- c. Rakennuksessa on alipainetta ulkoilmaan nähden ja niiden mukana kulkeutuu sisäilmaan maasta ja/tai rakenteista epäpuhtauksia, mutta sisäilmaan muodostuvat epäpuhtauspitoisuudet jäävät niin mataliksi, että niistä ei aiheudu rakennusten käyttäjille haittaa.

Rakenteiden läpi tulevien ilmavuotojen kuljettamia epäpuhtauksia on verrattu edellä olevan listan b-kohdassa ulkoilmaan, koska jo ulkoilma itsessään sisältää vaihtelevan määrän erilaisia yhdisteitä ja partikkeleita, kuten katu- ja siitepölyä, autojen pakokaasupäästöjä sekä erilaisia mikrobeja. Tällöin ulkoilman olosuhteet ja ilmanvaihto muodostavat sisäilman laadun perustason, johon ilmavuotojen vaikutuksia verrataan.

Vallitsevia painesuhteita tulee tarkastella vuodenajan (kesä/talvi), viikkorytmin (arkipäivä/lomapäivä) ja vuorokauden ajankohdan (käyttötunnit/käytön ulkopuoliset ajanhetket) mukaan, sekä tarkastelupisteittäin rakennuksen vaipan eri osissa.

Johtopäätökset paine-erojen hallinnasta ja tavoitteista

Edellä esitetyn jaottelun avulla on mahdollista tunnistaa keinoja paine-eroista johtuvien kosteusvaurioiden ja sisäilmahaittojen välttämiseksi samanaikaisesti. Kussakin eri lähestymistavassa on kuitenkin omat vahvuutensa ja heikkoutensa.

Tarkalleen paine-erottomaan tapaukseen (a-vaihtoehtoon) ei ole mahdollista päästä rakennuksissa. Vaikka paine-eron aikakeskiarvo tietyssä mittauspisteessä olisi nolla, on paine-erossa siihen liittyvä, tyypillisesti noin 5—15 Pa satunnaisvaihtelua sisältävä osuus. Lisäksi paine-eron keskiarvo ei pysynyt COMBI-hankkeessa tehdyissä palvelurakennusten mittauksissa samana ajanhetkestä toiseen, vaan vaihteli arkipäivien ja viikonloppu- ja loma-aikojen sekä päivä- ja yöaikojen välillä (ilmanvaihdon käyntiaikojen mukaan). Lisäksi on huomattava, että saman tilan ylä- ja alareunasta tehty mittauksilokset poikkesivat toisistaan systemaattisesti ja on harvinaista, että ylä- ja alareunassa vallitsisi paine-eroton tilanne yhtä aikaa. Yksittäisen kerroksen ylä- ja alareunan lisäksi vastaava ilmiö esiintyy monikerroksisen rakennuksen ylimmän ja alimman kerroksen välillä, jos kerrokset kuuluvat samaan paine-ero-osastoon.

Järjestelmällisen yli- tai alipaineen salliminen (b-vaihtoehto) ei myöskään ole nykyisessä tilanteessa ideaalinen ratkaisu. Sisäilman kosteuslisän keskiarvo oli nyt tarkastellussa 24 kohteen otoksessa pääosin pieni, mutta voi silti aiheuttaa ylimääräistä kosteuskuormitusta rakenteisiin. Nyt tarkastellussa kuntotutkimusaineistossa ei esiintynyt ainuttakaan rakenneratkaisua, jossa ei olisi esiintynyt kosteus- ja

mikrobivaurioita, eli lisäkosteusrasitusten järjestelmällinen salliminen nykyisin käytössä oleviin rakenteisiin lisäisi todennäköisesti niiden vaurioitumista. Toisaalta taas erityisesti maanvastaisissa rakenteissa, alapohjarakenteissa ja sekarakenteisissa ulkoseinärakenteissa esiintyi kuntotutkimusaineiston perusteella suuri määrä kosteus- ja mikrobivaurioita, jolloin ilmavuodot tiloihin rakenteiden kautta heikentävät sisäilman laatua.

Kolmannen lähestymistavan (c-vaihtoehto) voi ajatella eräänlaiseksi hybridiratkaisuksi, jossa paine-eroja, sisäilman kosteuskuormitusta tai epäpuhtauksia sisäilmaan ei pystytä täysin poistamaan, mutta ne pyritään pitämään niin pieninä, että niiden vaikutukset saadaan hallittua muilla keinoilla. Toisaalta rakenneratkaisujen toteutusta ja vikasietoisuutta on mahdollista parantaa siten, että rakenne kestää myös maltillisen ylipaineen mukana rakenteisiin siirtyvää sisäilman kosteutta vaurioitumatta.

Edellä esitetyn perusteella voidaan todeta, että käytännössä rakennusta ei voida toteuttaa siten, että vaihtoehdot a ja b olisivat mahdollisia. Näin ollen rakennus tulee tehdä niin, että se täyttää kohdissa c esitetyt kriteerit.

Paine-erojen keskiarvojen osalta osassa mittauspisteistä vallitseva paine-erotaso oli hyvin matala, jolloin haasteena on paine-erojen hallinta yksittäisten mittauspisteiden sijaan rakennuksen koko vaipan yli. Koska paine-erot ulkovaipan yli vaihtelevat rakennuksen korkeussuunnassa ja julkisivujen ilmansuunnan mukaan, edellyttäisi ulkovaipan yli vallitsevan paine-eron hallinta rakennuksen paine-ero-osastointia riittävän pieniin vyöhykkeisiin sekä korkeussuunnassa että ilmansuunnittain. Sopivan kokoisissa osastoissa ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirrat pystytään säätämään siten, että vallitseva paine-ero ulkovaipan yli pysyy alueella maltillisena. Koko rakennuksen yli esiintyvän paine-eron siirtäminen ulkovaipasta pääosin rakennuksen sisäisille rakenteille kasvattaisi ilmavuotoja näiden rakenteiden läpi, mutta toisaalta rakennuksen väliseinät ja välipohjat olisivat ulkoilman olosuhteita lämpimämmässä ja kuivemmissä olosuhteissa.

Osastointi ei poista paine-eron satunnaiskomponenttia, joka nimensä mukaisesti on seurausta satunnaisista muuttujista, kuten tuulesta ja rakennuksen käytöstä. Satunnaisilmiöitä itsessään tai niiden vaikutuksia on mahdollista pyrkiä jossain määrin pienentämään, mutta ei täysin poistamaan. Keinona on esimerkiksi suunnitella ilmanvaihtojärjestelmän säätölaitteille riittävät painehäviöt suhteessa koko järjestelmän painehäviöön (auktoiriteetit), jolloin järjestelmät toimivat tasaisemmin suhteessa ulkopuolisiin häiriötekijöihin.

Paine-ero-osastoinnissa tulisi ottaa huomioon keskeisenä tekijänä myös rakennuksen käyttö, jolloin toimintojen ja talotekniikan vyöhykkeistäminen sisältäisi myös paine-erojen hallintaan liittyviä tehtäviä (ks. arkkitehtuuria käsittelevä luku). Paine-ero-osastointia on tutkittu ja sitä toteutetaan erityisesti korkeassa rakentamisessa. Siitä on hyötyä myös muussa rakentamisessa, mutta sen suunnitelmallinen toteuttaminen laajasti vaatisi lisää tutkimusta, koulutusta ja panostuksia käytännön toteutukseen.

Paine-erojen enimmäisarvoja olisi mahdollista pienentää, kuten myös ilmanvaihdon aiheuttaman paine-eron vaihtelua päivä- ja viikkorytmin mukaan. Tätä varten kukin käyttötilanne tulisi tarkastella erikseen, minkä lisäksi säätämisen yhteydessä muodostuvia paine-eroja tulisi seurata jatkuvatoimisilla mittauksilla. Paine-erojen hetkelliset mittaukset eivät vielä anna kattavaa kuvaa palvelurakennusten painesuhteista.

Toimivaa kokonaisuutta tavoiteltaessa tulisi hyödyntää rakennuksen paine-ero-osastointia, rakenteiden ilmatiiviyttä ja taloteknisten järjestelmien ominaisuuksia siten, että vallitsevat paine-erotasot saadaan mataliksi; huolehtia ilmanvaihdon riittävästä ilmavirroista ja käyntiajoista sekä huuhtelevuudesta siten,

että sisäilman kosteuslisä ja haitta-ainepitoisuudet pysyvät matalalla tasolla; ja kehittää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vikasietoisuutta sekä käyttövaiheen aikaista seuranta- ja kunnossapitoa siten, että rakenteet sallivat ajoittaista ylipaineen aiheuttamaa kosteuskuormitusta ilman kosteus- ja mikrobivaurioiden muodostumista.

6.1.6 Sisäilman radonpitoisuus

Vuoden 2018 lopulla voimaan astunut uusi säteilyasetus laski olemassa olevia kouluja ja päiväkoteja koskevan sisäilman radonpitoisuuden viitearvon (toimenpiderajan) arvosta 400 Bq/m^3 , arvoon 300 Bq/m^3 . Uudisrakennusten osalta viitearvo on 200 Bq/m^3 , joka on ollut käytössä uudisrakentamisessa jo tätä ennenkin.

COMBI-hankkeessa tutkittujen palvelurakennusten sisäilman radonpurkkimittausten tulokset alittivat suurelta osin edellä mainitut viitearvot suoraan: Yhdessä mittauspisteessä 49:stä esiintyi 400 Bq/m^3 ylittävä radonpitoisuus, jonka lisäksi yhden mittauspisteen mittaustulos ylitti viitearvon 300 Bq/m^3 . Kouluille ja päiväkodeille radonpitoisuuden viitearvo määritetään työnaikaisena vuosikeskiarvona, kun taas radonpurkkimittaukset antoivat tietoa pidemmän ajan keskiarvosta talvikaudella. Lisäksi muutamia mittauspisteitä oli sijoitettuna aktiivisessa käytössä olevien käyttötilojen ulkopuolelle, esimerkiksi kellarikerrokseen. Näin ollen käyttötilojen ja käyttötilanteen keskimääräinen radonpitoisuus olisi todennäköisesti hieman alhaisempi, kuin nyt saaduissa tuloksissa.

Kohteissa tehtyjen jatkuvatoimisten radonmittausten perusteella radonpitoisuus vaihteli selvästi ilmanvaihdon käyntiaikojen mukaan. Pienemmän ilmanvaihtuvuuden aikaan öisin ja viikonloppuisin huonetilan radonpitoisuus nousi oleellisesti korkeammalle tasolle verrattuna suuremman ilmanvaihtuvuuden jaksoihin päiväaikaan. Muutos tapahtui nopeasti ja noudatteli tarkkaan ilmanvaihdon käyntiaikoja. Yksittäisen poikkeuksellisen korkean radonpurkkimittauksen tulosta selitti kyseisessä tilassa ilmanvaihdon sammuminen kokonaan, mikä nosti yöaikaisen radonpitoisuuden hyvin korkeaksi. Molemmissa edellä mainituissa korkean radonpitoisuuden kohteissa käytönaikaiset pitoisuudet olivat viitearvojen sisällä.

Radonpurkkimittausten tuloksista uudisrakentamisen viitearvon 200 Bq/m^3 alitti korjauskohteissa 21/24 mittauspistettä (10/12 kohteesta) ja uudiskohteissa 22/25 mittauspistettä (9/12 kohteesta). Uudis- ja korjauskohteiden radonpurkkimittaustulosten välillä ei ollut kaksisuuntaisen t-testin perusteella tilastollisesti merkitsevää eroa.

Rakennuksen tiloihin on suositeltavaa järjestää käyttötarpeen mukainen ilmanvaihto käytön aikana, mutta vähintään pieni ilmanvaihto myös käyttöajan ulkopuolella. Suuressa osassa kohteista radonpitoisuus oli purkkimittausten perusteella matalalla tasolla, mutta maanvastaisten rakenteiden ilmatiiviyyteen ja muihin radonin kulkeutumismekanismeihin on edelleen syytä kiinnittää huomiota.

6.2 Rakennusten energiankulutus

Rakennusten energiatehokkuutta tutkittiin kahdesta eri näkökulmasta: tarkastellen koulu- ja päiväkotirakennuksia sisältävän ison otoksen tilastollisia ominaisuuksia sekä vertailemalla määräystenmukaisuuden mukaisesti laskettuja kohteiden ostoenergiankulutuksen arvoja niiden toteutuneisiin lämpöenergian ja sähkön kulutustietoihin.

Rakennusten energiatehokkuuden vertailuun ison otoksen tapauksessa käytettiin lämmön ja sähkön ostoenergiankulutusta bruttoalaa kohti ($\text{kWh}/(\text{m}^2, \text{vuosi})$). Tämä vertailusuure ei COMBI-hankkeen tulosten perusteella havainnollista rakennuksen todellista energiatehokkuutta kaikissa tilanteissa, mutta se oli suure, joka oli saatavissa olevien lähtötietojen perusteella laskettavissa suurelle määrälle

rakennuksia. Tunnittaista energiankulutusdataa oli suuresta osasta rakennuksia käytettävissä laskutuspaikoittain. Tämä data oli kuitenkin koottu ensisijaisesti energiayhtiöiden näkökulmasta katsottuna ja saattoi sisältää joko yhden tai useamman rakennuksen tai rakennuksen osan, jotka itsessään tai käytön osalta saattoivat poiketa huomattavasti toisistaan. Rakennusten energiankulutuslaskelmat ja niiden energiankulutuksen mittaus tulisi yhdistää siten, että niiden vertaileminen on mielekästä ja mahdollista. Tämä järjestelmäkohtaisten suunnittelu- ja mittausarvojen yhtenäistäminen tulisi toteuttaa myös rakennuksen sisällä yksittäisten osajärjestelmien kohdalla.

6.2.1 Koulujen ja päiväkotien toteutunut energiankulutus

Koulujen ($n = 134$) bruttoalan, normeeratun lämpöenergiankulutuksen ja sähkönkulutuksen keskiarvot sekä 90 % arvoista sisältävät vaihteluvälit olivat 5400 (1440—9860) m², 160 (110—230) kWh/(m²,vuosi) ja 50 (25—90) kWh/(m²,vuosi). Vastaavat luvut päiväkodeille ($n = 71$) olivat 1020 (510—1580) m², 210 (130—300) kWh/(m²,vuosi) ja 80 (60-110) kWh/(m²,vuosi). Näissä luvuissa on mukana kouluja ja päiväkoteja 1800-luvun lopulta vuoteen 2013 asti ja ne sisältävät kaiken kohteissa käytetyn energiankulutuksen (laskutuksen perusteena oleva energiankäyttö). Tekemällä yksityiskohtaisempia jaotteluja ja hyödyntämällä olemassa olevaa energian kulutusdataa, voivat kiinteistöjen ylläpitäjät ja energiakonsultit arvioida yksittäisten rakennusten energiankulutusta suhteessa joko näihin yleisiin lukuihin tai mahdollisuuksien mukaan rajatumpiin ja edustavampiin aineistoihin.

Energian kulutustietojen vertailuaineistojen muodostamisen lisäksi yksi rakennusten energiankulutusta leimaava piirre oli kulutusarvojen suuri hajonta. Tarkasteltavasta joukosta riippuen otoksen korkeimpien arvojen suhde matalimpiin arvoihin oli noin 2–3 -kertainen. Kymmenen vuoden jaksoissa tarkasteltaessa koulujen ja päiväkotien lämmön ja sähkönkulutuksen keskihajonta ei riippunut tilastollisesti rakennusvuodesta, eli energiankulutuksen hajontaa esiintyi yhtä lailla sekä vanhoissa että uusissa rakennuksissa. Tällöin on kuitenkin hyvä huomata, että tutkimuksen aikaan uusimpien (2012 vuoden) määräysten mukaan suunniteltujen ja toteutettujen kohteiden vertailukelpoista energiankulutusdataa ei ollut tarkasteluja tehtäessä vielä saatavilla.

Yksi aineistossa oleva tilastollisesti merkitsevä trendi oli sähkönkulutuksen kasvu uusissa kouluissa vanhoihin verrattuna. Trendin jatkuessa samana sähkön omatuotannon hyödyllisyys kasvaisi kouluissa päiväkoteihin verrattuna erityisesti silloin, kun omatuotanto saadaan hyödynnettyä kyseisessä rakennuksessa.

Rakennusten bruttoalalla oli vaikutusta sekä lämmön että sähkön bruttoalaa kohti laskettuun energiankulutukseen. Rakennuksen bruttoalan kasvaessa neliometriä kohti lasketut lämmön ja sähkön ostoenergian kulutusarvot olivat keskimäärin alhaisempia pienempiin rakennuksiin verrattuna. Merkittäviä eroja tuli esille kuitenkin vasta kertaluokkaa olevilla suuruuseroilla. Lattiapinta-alan vaikutus on tällä hetkellä mukana energiatehokkuusvaatimuksissa pientalojen osalta, mutta se olisi perusteltua olla mukana myös koulujen ja päiväkotien osalta.

Tarkasteltaessa rakennusten energiankulutusta vain rakennusten energiatehokkuusmääräysten voimassaolon ajalta, oli uudempien rakennusten lämmönkulutus pienempi vanhempiin verrattuna erityisesti päiväkotirakennusten osalta. Lattiapinta-alaa kohti laskettu ostoenergiankulutus laski kuitenkin vähemmän, kuin mitä energiatehokkuusmääräysten vaatimus- ja vertailuarvot ovat muuttuneet. Samaan aikaan sähkönkulutus uusissa rakennuksissa oli korkeampi vanhempiin rakennuksiin verrattuna, kuten edellä oli esillä. Rakennusten energiatehokkuusmääräykset eivät kuitenkaan koske toteutuvaa energiankulutusta, vaan suunnittelu- ja toteutusratkaisujen valintaa, joten määräyksien mukaan laskettu ja toteutunut energiankulutusarvot eivät nykymuodossaan ole täysin

vertailukelpoisia. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että energiatehokkuusmääryksien sisältämät muutokset rakennusten ja sen järjestelmien energiatehokkuudesta eivät antaneet tarkkaa kuvaa rakennusten toteutuneen energiankulutuksen tai energiatehokkuuden muutoksista.

6.2.2 Määräystenmukaisuuden osoittaminen ja vertailu toteutuneeseen energiankulutukseen

Laskelmien tekeminen rakennusten energiatehokkuudesta ja muista asioista on hyödyllistä, koska niiden avulla saadaan konkreettisia lukuja päätöksenteon tueksi. Kehittyneitä laskentamalleja ja kohdekohtaisesti määritettyjä lähtötietoja käyttämällä on mahdollista saada laskennallinen rakennuksen energiankulutus vastaamaan toteutuneita arvoja hyvin. Erityisesti rakennuksia vasta suunniteltaessa tilanne on kuitenkin usein se, että kaikkia lähtötietoja ei ole tarkasti saatavilla, jolloin puuttuvat arvot joudutaan arvioimaan kirjallisuudessa esitettyjen tietojen perusteella. Puutteellisia lähtötietoja käytettäessä eri laskentamenetelmien tarkkuus suhteessa toteutuviin arvoihin voi myös muuttua. Rakennusten energiatehokkuuden määräystenmukaisuuden osoittaminen tehdään niin kutsutun vakiodun käytön avulla, jonka perusteella lasketulle rakennuksen energiatehokkuuden laskennalliselle vertailuluvulle (E-luvulle) on asetettu raja-arvot. Ideaalisessa tilanteessa määräystenmukaisuuden osoittamisessa käytetyt menetelmät ja lähtötiedot vastaavat rakennusten todellista käyttöä siten, että määräystasoon pääsemiseksi valitut toimenpiteet ovat parhaita myös rakennusten todellisen käytön näkökulmasta.

Kahdeksantoista koulu- ja päiväkotirakennuksen tulosten perusteella lämmön ja sähkön toteutuneet ostoenergiankulutukset olivat suurempia, kuin määräystenmukaisuuden osoittamisen mukaisesti kuukausitason menetelmällä lasketut ostoenergian kulutusarvot. Lämpöenergian osalta erotusten keskiarvo ja 90 % vaihteluväli olivat +50 (5—140) % ja sähkön osalta +15 (-5—60) %, jossa arvot on pyöristetty viiden prosentin tarkkuuteen. Ero laskettujen ja toteutuneiden arvojen välillä oli suurempi lämpöenergian kulutuksen osalta sekä absoluuttisesti että suhteellisesti, vaikka laskennan ulkopuolisia kulutuskohhteita oletettiin olevan ensisijaisesti sähkönkulutuksen puolella. Näistä kahdesta kokonaisuudesta tulisi siis erityisesti lämpöenergian kulutuksen laskentaa pyrkiä kehittämään.

Rakennusten ostoenergiankulutus laskettiin vakiodulla käytöllä myös IDA-ICE -simulointiohjelman avulla, mutta tämä ei muuttanut laskentatuloksia merkittävästi. Tarkemman laskentaohjelman käyttö ei siis poistanut huomattavan suurta eroa määräystenmukaisuuden osoittamisen mukaisen ostoenergiankulutuksen laskennan ja toteutuneen ostoenergiankulutuksen välillä. Näin ollen ensisijainen syy eroihin laskentatulosten ja toteutuneiden arvojen välillä oli laskennan lähtötiedoissa. Kuukausitason laskelmien ja simulointitulosten samankaltaisuus tukee myös sitä asiaa, että nykyiset energiamääräykset sallivat kuukausitason laskennan käyttämisen rakennuksille, joissa ei ole jäähdytystä tai että jäähdytystä on vain yksittäisissä tiloissa.

Rakennusten energiankulutus laskettiin myös käyttämällä energiatehokkuusasetuksen mukaisten ilmavirtojen sijaan kohteiden suunniteltuja ilmavirtoja ja todellisen sijaintipaikkakunnan säävyöhykkeen olosuhteita. Nämä muutokset paransivat laskettujen ja toteutuneiden arvojen vastaavuutta osassa kohteista, mutta toisaalta heikensivät vastaavuutta toisissa. Sijaintipaikkakunnan ja ilmanvaihdon vaikutukset energiankulutukseen ovat muiden COMBI-hankkeen tulosten perusteella keskeisiä, mutta nyt tehdyt muutokset eivät vielä olleet riittäviä tarkkuuden parantamiseksi merkittävästi. Suosituksena siis tässä vaiheessa on, että todellisen käytön mukaista laskentaa varten pyritään määrittämään kaikki laskennan lähtötiedot hyvin ja todellisen tilanteen mukaan.

Toteutuneen energiankulutuksen ja määräystenmukaisuuden osoittamiseksi laskettavien kulutusarvojen välisestä keskimääräisestä isosta erosta huolimatta arvojen välillä esiintyi kuitenkin selvä korrelaatio. Laskennallisesti vähemmän energiaa kuluttavat rakennukset olivat sitä myös toteutuneen kulutuksen osalta. Samaan aikaan kuitenkin erot sekä lämmön että sähkön ostoenergian osalta kasvoivat sekä absoluuttisesti että suhteellisesti siirryttäessä kohti pienempää energiankulutusta (kWh/(m²,vuosi)). Tällöin siis riski epäoptimaalisille suunnitteluvalinnoille on suuri erityisesti hyvin energiatehokkaiden rakennusten tapauksessa ja laskentaa tulisi kehittää erityisesti näiden rakennusten osalta.

Uusissa palvelurakennuksissa on siis syytä varautua siihen, että nykyisellä laskentamenetelmällä määräystenmukaisuuden osoittamiseksi määritettävä ostoenergiankulutus ei vastaa rakennuksen toteutuvaa energiankulutusta. Erilaisten laskentatarkastelujen näkökulmasta asiaa on käyty läpi seuraavassa luvussa.

6.2.3 Toteutuvan energiankulutuksen ennakointi

Rakennusten energiankulutuksen ja energiatehokkuuden arvioimiseksi on olemassa suuri joukko erilaisia suureita ja menetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi yksinkertaisten indikaattoreiden käyttäminen, lämpöhäviöiden tasauslaskelma ja sen johdannaiset, kuukausitason energiankulutuksen laskenta ja dynaamiset simuloinnit. Näitä eri menetelmiä voidaan käyttää myös optimointimenetelmien osana. COMBI-hankkeessa on kehitetty eteenpäin taulukkolaskentaohjelmaan rakennettua KOP-COMBI-kustannusoptimointityökalua ja toisaalta laajemmissa kustannusoptimaalisuustarkasteluissa on käytetty muissa hankkeissa aikaisemmin kehitettyä MOBO-monitavoiteoptimointityökalua.

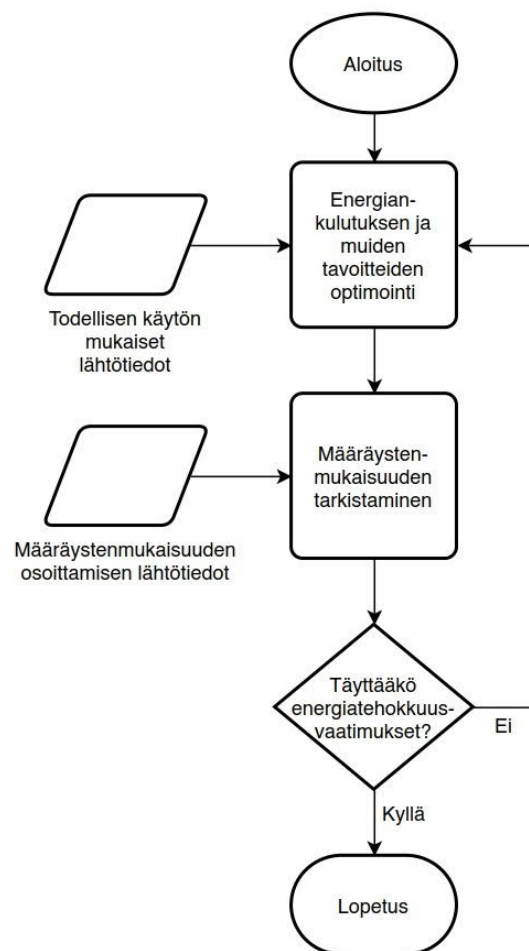
Yksinkertaiset indikaattorit, kuten rakenneosien lämmönläpäisykerroin (U-arvo), ilmanvaihdon lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde tai rakennuksen muotokerroin ovat tärkeitä käsitteiden yhtenäistäjiä ja yhteistyön helpottajia, mutta ne pystyivät COMBI-hankkeen tarkasteluissa vain poikkeustapauksissa kuvaamaan rakennusten energiatehokkuutta ja kaikkia siihen liittyviä asioita laajasti ja tasapainoisesti. Yksi niiden eduista on hyvin pitkälle viety määritelmien yksiselitteisyys, mutta toisaalta tämä on mahdollista vain tiukoilla rajauksilla. COMBI-hankkeen kokemusten perusteella rakennusten energiatehokkuuden ja toimivuuden arviointiin tarvitaan useita erilaisia suureita ja menetelmiä, joiden tärkeyden painoarvot valikoituvat lopulta muun muassa voimassa olevan lainsäädännön, käytettävissä olevien resurssien ja päätöksentekijän tahtotilan perusteella.

Lämpöhäviöiden tasauslaskelman mukainen rakennuksen kokonaislämpöhäviö (W/K) korreloi kahdenkymmenen kohteen lämmön ostoenergiankulutuksen laskettuihin arvoihin hyvin ($R^2 = 0,93$), mutta toteutuneisiin arvoihin melko heikosti ($R^2 = 0,11$). Käytettäessä tasauslaskentaa eri vaihtoehtojen vertailemiseen, tulee käyttäjän tiedostaa laskettujen arvojen absoluuttisen ja suhteellisen eron kasvu toteutuneisiin kulutustietoihin verrattuna ja erityisesti hyvin energiatehokkaita vaihtoehtoja vertailtaessa käyttää tarkempia menetelmiä.

Kuukausitason laskentamenetelmän (RakMK D5-2012) tarkkuutta rakennuksen vakioidulla käytöllä on kuvattu tarkemmin edellisessä luvussa. Nyt tehtyjen tarkastelujen perusteella kuukausitason menetelmän korvaaminen simuloinnilla ei automaattisesti paranna laskelmien ennustetarkkuutta, ellei kohteen tarkasteleminen lähtökohtaisesti edellytä simulointimenetelmien käyttämistä tai simulointimenetelmien mahdollisuuksia aidosti käytetä rakennuksissa tapahtuvien ilmiöiden kuvaamiseen kuukausitason menetelmää tarkemmin. Esimerkiksi COMBI-hankkeessa tehtyjen kustannusoptimaalisuustarkastelujen osana tehtyjä simuloituja varten määritettiin kohdekohtaiset tuntitason käyttöprofiilit lämpimän käyttöveden, käyttäjien läsnäolon ja muiden vastaavien suureiden osalta. Korjauskohteiden simuloinnin osalta tämä on jo käytössä oleva ja yksi suositeltava tapa.

Uudiskohteissa toteumatietoa ei ole olemassa, joten suunnittelu tulee tehdä muutoin saatavilla olevan parhaan tiedon avulla.

Laskentamenetelmien tarkkuutta ja eri menetelmien käyttämistä koskevat huomiot on koottu toimintamalliksi kuvaan 3. Suosituksena on lähestyä rakennusten energiankulutuksen ja muiden suureiden laskentaa ensisijaisesti kohdekohtaisten lähtötietojen (jotka ovat käytettävissä suunnitteluvaiheessa) ja siinä esiintyvien tarpeiden lähtökohdista ja vasta tämän jälkeen arvioida suunnitteluratkaisun määräystenmukaisuutta. Jos rakennus ei täytä energiatehokkuusvaatimuksia, tällöin tulisi palata vertailemaan eri toimenpiteitä todellisen käytön mukaiseen tilanteeseen. Iterointia todellisen käytön ja määräystenmukaisuuden osoittamisen välillä jatkettaisiin, kunnes soveltuva ratkaisu löydetään. Tämä on pohjimmiltaan se lähestymistapa, miten lainsäädännön asettamia reunaehtoja yleisesti ottaenkin suositellaan tulkittaviksi.



Kuva 3. Rakennusten energiatekninen suunnittelu on suositeltavaa tehdä käyttäen kohdekohtaisia tarkempia suunnittelun lähtötietoja ja vasta tämän jälkeen tarkistaa energiatehokkuusvaatimusten täyttyminen vakioidulla käytöllä. Tarvittaessa energiatehokkuuden parannukset suunnitellaan palaten käyttämään kohdekohtaisia lähtötietoja.

Kuvassa 3 esitetty toimintamalli koskee yksittäisen kohteen laskentatarkastelujen suorittamista, jossa esimerkiksi energiankulutuksen ja muiden tavoitteiden laskenta ja optimointi on mahdollista tehdä COMBI-hankkeessakin käytetyillä ja tutkituilla menetelmillä. Tämä on kuitenkin vain osa laajempaa laskentatarkastelujen tarkkuuden parantamista, jossa toteutuvia arvoja verrataan suunnitteluvaiheen

arvoihin ja eroavaisuuksista kertyvää tietoa hyödynnetään myöhemmin uusien kohteiden suunnitteluvaiheessa sekä olemassa olevien kohteiden seurannassa.

Jotta suunniteltujen ja toteutuvien arvojen väliset erot saadaan hyödynnettyä jatkuvaa oppimista varten, tulee niiden muodostaa jatkumo rakennusten suunnittelusta käyttöön ja seurantaan. Lisäksi seurattavien suureiden tulee olla määritelty järjestelmäkohtaisesti siten, että eroavaisuuksien juurisyyt on mahdollista selvittää konkreettisten toimenpiteiden valitsemiseksi. Monimutkaisissa tai laajoissa tapauksissa suunnittelu- ja toteuma-arvojen seurantaa voidaan priorisoida kaikkein suurimpiin tai tärkeimpiin kulutuskohteisiin.

Liitteet

Liite 1: Rahoittajat sekä kaupunki- ja kuntayhteistyökumppanit, 2 s.

Liite 2: Julkaisuluettelo sekä tulokortti- ja taustajulkaisutaulukko, 13 s.

Liite 3: Tulokortit, 90 s.

Liite 4: COMBI 8 -suositukset, 6 s.



TAMPEREEN
TEKNILLINEN
YLIOPISTO



BUSINESS
FINLAND



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

COMBI-tutkimushankkeen rahoittajat sekä kaupunki- ja kuntayhteistyökumppanit

Rahoittajat

BUSINESS
FINLAND



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

C R A M O

PEAB

PIRKANMAA

RAMBOLL

RUUKKI

Schneider
Electric

SKANSKA

SWECO

VAHANEN

A-INSINÖÖRIT

ALASEN
RAKENNUS OY

ARKTA

FCG

FINNFORM
MAAN PARAS ERISTE

Granlund
Less energy gives more

MetsäWood

Purfin

SYK
SUOMEN YLIOPISTOKIINTEISTÖT OY

Tampereen
SÄHKÖLAITOS
KAUKOLÄMPÖ OY

uponor

ARKKITEHTIPALVELU .fi

NEVA
ARKKITEHDIT

AX-Suunnittelu

Difina

enermix

Helvar

MEHTO
Insinööri-toimisto Lauri Mehto Oy

KARAWATSKI OY
SÄHKÖTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO

KNAUF

Nokian
Talotekniikka Oy

TEKNOCALOR

Redi-Yhtiöt Oy

SIRATE

SKAALA®
IKKUNAT JA OVET

Sisäilmakeskus

DIMENSIO OY

TERMATER

Kaupungit ja kunnat



Tampere



Tampereen kaupunkiseutu



Helsinki



Kangasala



Lempäälä



Nokia



Orivesi



Pirkkala



Vesilahti



Ylöjärvi



Ekokumppanit Oy

COMBI-hankkeen julkaisuluettelo sekä tulostkortti- ja taustajulkaisutaulukko

Tilanne 24.1.2019. Ajantasaiset tiedot valmistuneista julkaisuista ovat saatavilla osoitteessa:

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka>

Julkaisut on jaoteltu tässä liitteessä julkaisutyypin mukaan. Aihepiireittäin jaoteltu julkaisuluettelo löytyy hankkeen kotisivuilta (kts. Internet-osoite edellä).

Loppuraportti ja suosituslista

COMBI 8 suositukset (2019) COMBI-hankkeen suositukset energiatehokkaaseen rakentamiseen – COMBI 8. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennustekniikka. 5 s. Saatavilla: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/>

Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Tapio Kaasalainen, Pirkko Pihlajamaa, Olli Teriö, Juha Jokisalo, Petri Annila, Pirkko Harsia, Markku Hedman, Juhani Heljo, Kari Kallioharju, Antti Kauppinen, Paavo Kero, Henna Kivioja, Taru Lehtinen, Tero Marttila, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Jukka Paatero, Tuomas Raunima, Annu Ruusala, Paula Sankelo, Pauli Sekki, Kai Sirén, Eero Tuominen, Olli Tuominen, Ulrika Uotila & Sakari Uusitalo (2019) Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennustekniikka. Tutkimusraportti 168. 45 s. + 111 liites. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4306-7>

Tieteelliset lehtiartikkelit

Petri Annila, Matti Hellemaa, Toni Pakkala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo & Matti Pentti (2017) Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. Case Studies in Construction Materials. Volume 6, June 2017, Pages 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.003>

Petri Annila, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti & Juha Vinha (2018) [Need to repair moisture- and mould damage in different structures in Finnish public buildings](#). Journal of Building Engineering. Vol 16. Pages 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.12.010>

Taru Lindberg, Tapio Kaasalainen, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Markku Hedman & Juha Vinha (2018) Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency, Advances in Building Energy Research, DOI: [10.1080/17512549.2018.1488619](https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1488619)

Annu Ruusala, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (2018) Energy consumption of Finnish schools and daycare centers and the correlation to regulatory building permit values. Energy Policy, Volume 119, August 2018, Pages 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.029>

Paula Sankelo, Juha Jokisalo, Jonathan Nyman, Juha Vinha & Kai Sirén (2018) Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate. International Journal of Sustainable Energy, DOI: [10.1080/14786451.2018.1448398](https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1448398)

Tulossa:

Filip Fedorik, Roosa Heiskanen, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (n.d.) Effects of internal thermal insulation on hygrothermal behaviour of basement walls.

Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen, Antti Mäkinen, Malin Moisio, Markku Hedman & Juha Vinha (2019) Window design and energy efficiency: a multivariable simulation study in Finnish climates.

Antti Kauppinen, Eero Tuominen & Juha Vinha (2019) Air pressure differences in Finnish schools and daycare centers.

Antti Kauppinen, Tuomas Raunima, Eero Tuominen, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (n.d.) Indoor air measurements in Finnish schools and daycare centers.

Henna Kivioja & Juha Vinha (2019) Hot-box measurements to investigate internal convection of highly insulated loose-fill mineral wool roof structures.

Jukka Paatero, Juha Jokisalo & Juha Vinha (2019) Implementing renewable energy generation for public buildings: the Finnish regulations perspective (työnimi). Käsikirjoitus lähetetään julkaistavaksi International Journal of Sustainable Energy -lehdessä keväällä 2019.

Pauli Sekki & Juha Vinha (2019) Moisture behavior of highly insulated precast element walls.

Tero Marttila, Petri Annala, Jukka Lahdensivu & Juha Vinha (2019) Kosteus- ja mikrobivaurion vakavuuden arviointi.

Kansainväliset konferenssiartikkelit

Juha Jokisalo, Paula Sankelo, Juha Vinha, Kai Sirén & Risto Kosonen (2019) Cost optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate. Proceedings of the 13th REHVA World Congress CLIMA, May 26-29, 2019, Bucharest, Romania.

Marko Keinänen, Ulrika Uotila, Jaakko Sorri, Olli Teriö & Kalle Kähkönen (2016) Consensus Building In The Pre-design Phase of Building Projects. 12 p. World Building Congress 30.5.-3.6.2016, Tampere, Finland.
https://www5.shocklogic.com/scripts/jmevent/programme.php?client_Id=FACE&project_Id=WBC16

Mihkel Kiviste & Juha Vinha (2017) Air pressure difference measurements in Finnish municipal service buildings. 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway. Published in: Energy Procedia, Volume 132, October 2017, Pages 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.690>

Tero Marttila, Petri Annala, Jommi Suonketo, Juha Vinha & Anne Hyvärinen (2018) Updated Constructional Guidelines for Implementation of Healthy Building in Remediation in Finland. 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate. Indoor Air Conference 2018, July 22 – 27, 2018. Philadelphia, USA. 2 p.

Olli Teriö, Jari Hämäläinen, Ulrika Uotila, Jaakko Sorri & Arto Saari (2016) Moisture and building processes in Finland. 11 p. World Building Congress 30.5.-3.6.2016, Tampere, Finland.
https://www5.shocklogic.com/scripts/jmevent/programme.php?client_Id=FACE&project_Id=WBC16

Tulossa:

Annu Ruusala, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (2019) Comparison between calculated and billed building energy consumption values of schools and daycare centers. The 4th Central European Symposium on Building Physics. Prague, Czech Republic, 2.-5.9.2019. Abstract accepted.

Olli Tuominen, Eero Tuominen, Maarit Vainio & Juha Vinha (2019) Thermal and Moisture Property Measurements of Calcium Silicate Insulation Boards. The 4th Central European Symposium on Building Physics. Prague, Czech Republic, 2.-5.9.2019. Abstract accepted.

Tuomas Raunima, Eero Tuominen & Juha Vinha (2019) Behavior of Capacitive Humidity Sensors in Monitoring the Drying of Concrete Walls. The 4th Central European Symposium on Building Physics. Prague, Czech Republic, 2.-5.9.2019. Abstract accepted.

Kansalliset konferenssit ja seminaarit

Rakennusfysiikka-seminaari:

Petri Annala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (2017) [Kosteusvaurioiden vakavuus kuntien rakennuksissa](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Juha Jokisalo, Paula Sankelo, Kai Sirén & Juha Vinha (2017) [Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Antti Kauppinen, Mihkel Kiviste, Joni Pirhonen & Juha Vinha (2017) [Paine-erot Pirkanmaan ja Helsingin julkisissa palvelurakennuksissa](#). 8 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Anssi Laukkarinen, Roosa Heiskanen & Juha Vinha (2017) [Maanvastaisten seinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Malin Moisio, Taru Lindberg, Tapio Kaasalainen & Antti Mäkinen (2017) [Arkkitehtuurin ja tilasuunnittelun vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Pirkko Pihlajamaa, Sakari Uusitalo & Olli Teriö (2017) [Toimivuustarkastusten merkitys rakennuksen elinkaarelle](#). 5 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Annu Ruusala & Juha Vinha (2017) [Koulujen ja päiväkotien laskettu ja toteutunut energiankulutus](#). 8 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Pauli Sekki, Lauri Korhonen & Juha Vinha (2017) [Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla](#). 8 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Jaakko Sorri, Juhani Heljo, Ulrika Uotila & Annu Ruusala (2017) [Energiatehokkuusinformaatio palvelurakennuksissa](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Olli Teriö, Juhani Heljo, Sakari Uusitalo & Pirkko Pihlajamaa (2017) [Energiakortti rakennushankkeen energiatavoitteiden asettamisessa ja todentamisessa](#). 4 s.

Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Eero Tuominen, Maarit Vainio & Juha Vinha (2017) [Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Ulrika Uotila, Olli Teriö, Paavo Kero, Tero Marttila & Malin Moisio (2017) [Sisäilmaongelman koulun korjausvaihtoehtojen ja purkamisen vertailu - case-tutkimus](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Kari Vanttinen, Eero Tuominen & Juha Vinha (2017) [Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen](#). 10 s. Seminaarijulkaisu: Rakennusfysiikka 2017, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

Sisäilmastoseminaari:

Petri Annila, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha (2017) [Eri ikäisten kuntarakennusten korjaustarpeet](#). 6 s. Seminaarijulkaisu: Sisäilmastoseminaari 2017, SIY Raportti 35.

Sisäilmapaja:

Tero Marttila (2017) Päivityksessä kriteerit terveen talon toteutukseen. [Sisäilmapaja9](#), Porvoo, 15.-16.11.2017

Pirkko Pihlajamaa (2016) TAPRE-toimivuustarkastelut ja näkyväksi tehty olosuhdeseuranta. [Sisäilmapaja8](#), Tampere, 16.-17.11.2016.

Sakari Uusitalo (2016) Hyödynnäkö jo hankittua kiinteistöautomaatiota olosuhdeseurantaan ja -hallintaan? [Sisäilmapaja8](#), Tampere, 16.-17.11.2016

Saara Vänskä (2016) Puhdistettava talotekniikka - kehittämisaskeleita näköpiirissä. [Sisäilmapaja8](#), Tampere, 16.-17.11.2016

Raportit ja kirjojen luvut

Petri Annila, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo & Matti Pentti (2016) Practical Experiences from Several Moisture Performance Assessments. Building Pathology and Rehabilitation, Vol 5, Recent Developments in Building Diagnosis Techniques. Delgado, J.M.P.Q. (Ed.) Book chapter, pp. 1-20. <https://www.springer.com/us/book/9789811004650>

Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen, Malin Moisio & Markku Hedman (2018) Ikääntyneiden tehostettu palveluasuminen – Tilallisten ratkaisujen tehokkuudesta ja toimivuudesta. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laboratorio. Asuntosuunnittelu. Julkaisu nro. 33. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4286-2>. 62 s.

Taru Lehtinen, Anna Papinsaari, Tapio Kaasalainen, Malin Moisio & Markku Hedman (2018) Peruskoulut ja energiatehokkuus – Tilallisista ja toiminnallisista suunnitteluperiaatteista. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laboratorio. Asuntosuunnittelu. Julkaisu nro. 34. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4287-9>. 86 s.

Malin Moisio, Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen & Markku Hedman (2018) Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laboratorio. Asuntosuunnittelu. Julkaisu nro. 32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4285-5>. 142 s.

Kim Talus, Sirja-Leena Penttinen & Mikko Kantero (2016) [Uusiutuvan energian etätuotantoon liittyvät yhteiskunnalliset ja juridiset kysymykset](#). 50 s.

Tulossa:

Tero Marttila, Jommi Suonketo, Petri Annila & Paavo Kero (2019) Terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen. Tampereen yliopisto, Tampere.

Vinha, J. et al. (n.d.) Uusien ja korjattujen palvelurakennusten kenttämittaukset COMBI-tutkimushankkeessa. Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka.

Diplomityöt

Roosa Heiskanen (2016) Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen. Diplomityö, 82 s. + 14 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201606014206>

Antti Kauppinen (2018) Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli. Diplomityö, 102 s. + 228 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201811292781>

Lauri Korhonen (2018) Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut. Diplomityö, 86 s. + 11 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201805091631>

Taru Lindberg (2015) Vihreä asuinkerrostalo. Selvitys ekologisen asuinkerrostalon passiivisista suunnitteluratkaisuista energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen näkökulmista. Diplomityö 297 s. Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laitos, Asuntosuunnittelu, julkaisu 21. ISBN 978-952-15-15-3645 (PDF). <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201511111707>

Lilja Mustila (2017) Monikäyttöinen koulu – joustavuudella ekologisuutta tilasuunnitteluun. Diplomityö 76 s. Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuuri. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201705111374>

Kaisa Nissilä (2017) Energiatehokas kyläkoulu puusta - Lähes nollaenergiakoulu Laukaalle. Diplomityö 64 s. Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuuri. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201705101369>

Jonathan Nyman (2016) Cost Optimal Heating and Cooling Systems in Nearly Zero Energy Service Buildings. MSc thesis 105 p. + 10 app. p. Aalto University, School of Engineering, Department of Energy Technology. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201604201855>

Joni Pirhonen (2017) Sisäilman olosuhdemittaukset uusissa ja korjatuissa palvelurakennuksissa. Diplomityö, 78 s. + 18 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201704261344>

Annu Ruusala (2016) Koulujen ja päiväkotien laskennallinen ja toteutunut energiankulutus. Diplomityö 73 s. + 8 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201605254140>

Paula Sankelo (2016) Optimal production and use of solar energy in municipal nearly Zero Energy service buildings. Master of Science Thesis, 105 p. Aalto University, Department of Mechanical Engineering, Energy Efficiency and Systems. KTH School of Industrial

Engineering and Management, Energy Technology, Division of Energy Systems Analysis.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201612085855>

Niko Simola (2016) Hyvän sisäilmaston varmistaminen rakennuksen takuuaikana. Diplomityö 79 s. + 6 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan DI-tutkinto-ohjelma, Rakennustuotanto. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201606304327>

Joel Tirkkonen (2016) Talotekniikkatyöt rakennusurakoitsijan näkökulmasta. Diplomityö 65 s. + 32 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Talotekniikka. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201608094403>

Maarit Vainio (2016) Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Diplomityö 67 s. + 19 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201611244761>

Jutta Vuorinen (2017) Tulevaisuuden koulu – Arkkitehtuurin neljä näkökulmaa ekologiseen rakentamiseen. Diplomityö 104 s. Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuuri. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201705101368>

Kari Vanttinen (2017) Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Diplomityö 79 s. + 9 liites. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Rakennesuunnittelu. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201711282276>

Tulossa:

Tuomas Raunima (2019) Kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien ja kipsivalulattioiden kuivumisen seurannassa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Julkaistaan 2019.

Olli Tuominen (2019) Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet ja mittausmenetelmien kehitys. Julkaistaan 2019.

Opinnäytetyöt

Juha-Pekka Aaltonen (2017) Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät. Valaistuksen mallintaminen COMBI-hankkeessa. Opinnäytetyö 26 s. + 5 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705168395>

Jouni Hytönen (2017) Tilaratkaisuiden ja aurinkosuojauksien tutkiminen dynaamisella olosuhdesimuloinnilla. COMBI-hanke. Opinnäytetyö 45 s. + 5 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705138043>

Jarkko Jalli (2017) Sähköenergian kulutussensuranta Pirkanmaan palvelurakennuksissa. COMBI-hanke. Opinnäytetyö 99 s. + 10 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705199108>

Aki Kortetmäki (2015) Talotekniikan toimivuus Pirkanmaan palvelurakennuksissa. Opinnäytetyö 91 s. + 9 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikka, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604194594>

Lauri Louhi (2017) Energiankulutustietojen analysointi ja hyödyntäminen. Opinnäytetyö 50 s. + 29 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <https://research.tuni.fi/uploads/2019/01/0591e55d-x213899.pdf>

- Sami Mikkola (2016) Automaation vaikutus energiatehokkuuteen Pirkanmaan palvelurakennuksissa. Opinnäytetyö 47 s. + 5 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikka, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604204673>
- Sami Montonen (2016) Sähköenergiankulutusten vertailu ja analysointi. Opinnäytetyö 40 s. + 1 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201605066439>
- Sami Nieminen (2017) Energiatehokkaan valaistuksen hankinta COMBI-kohteissa. Opinnäytetyö 37 s + 7 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, Sähköinen talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705127950>
- Matias Pekkanen (2017) Lämpöenergia- ja vesimittaukset case-kohteissa. COMBI-hanke. Opinnäytetyö 37 s. + 10 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705127887>
- Iida Päivömaa (2016) Energiatehokkuus Pirkanmaan alueen palvelurakennuksissa. Opinnäytetyö 51 s. + 2 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-tekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604033791>
- Svante Vaskikallio (2017) Rakennusten sisäolosuhteiden mittaaminen ja näkyväksi tekeminen. Opinnäytetyö 45 s. + 1 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705107320>
- Suvi Virta (2016) Talotekniikan toimivuus viidessä COMBI-hankkeen case-kohteessa. LVI-talotekniikkapainotus. Opinnäytetyö 81 s. + 17 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201605036029>
- Saara Vänskä (2016) Puhdistettava talotekniikka. Siivouksen ja talotekniikan yhteisvaikutus koulurakennusten sisäilmastoon. Opinnäytetyö 91 s. + 18 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201603303653>

Muut julkaisut

- Saara Vänskä, Pirkko Pihlajamaa & Leila Kakko (2016) Talotekniikkaakin pitää puhdistaa. Talotekniikka, toukokuu 2016. 3 s.
- Olli Teriö (2017) Energiatehokkaan rakennuksen hankeprosessi. Rakentajain kalenteri 2017.
- Pirkko Pihlajamaa et al. (2018) COMBI-hanke 2015-2018. Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings. Poster, Sisäilmapaja10, 14.-15.11.2018.
- Juhani Heljo (2019) KOP-COMBI Kustannusoptimaalisuustyökalu.
- Olli Teriö (2017) Sisäilmaprosessien kuvaukset.

Tuloskortit ja diasarjat

COMBI-hankkeen tuloskortit (45 kpl) ja niiden liittyminen eri taustajulkaisuihin on kuvattu seuraavissa taulukoissa. Kuhunkin tuloskorttiin liittyy yhdet esitysdiat, sillä poikkeuksella, että peruskoulujen arkkitehtisuunnittelua koskevat diaesitykset ja lämmöneristetyypin vaikutusta sisäkuorielementin kuivumiseen käsittelevät diaesitykset on koottu omiksi esityksikseen. Eri aiheita käsitteleviä esityksaineistoja on yhteensä 41 kpl.

COMBI-hankkeen tulokset ja julkaisu

Tilanne 24.1.2019

WP2: Arkkitehtuuri ja tilat

Numero	Tuloskortin otsikko	Sijainti		Taatajajulkaisu Tekijä(t)	Otsikko	Julkaissapaikka	Sijainti	
		Prosessi	A/R/T				Prosessi	A/R/T
1	Energiatohokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortti	Tilaaminen, Suunnittelu	ARK	Malin Moisio, Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen, Markku Hedman	Energiatohokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortti, raportti	TTY	Tilaaminen, Suunnittelu	ARK
				Malin Moisio, Taru Lindberg, Tapio Kaasalainen, Antti Mäkinen	Arkkitehtuurin ja tilasuunnittelun vaikutus rakennuksen energiatohokkuuteen	Rakennusliikkeen 2017	Tilaaminen, Suunnittelu	ARK
2	Ikäntyneiden tehostetun palveluasumisen tilalliset ja toiminnalliset suunnitteluratkaisut	Suunnittelu	ARK	Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen, Malin Moisio, Markku Hedman	Ikäntyneiden tehostettu palveluasuminen – Tilallisten ratkaisujen tehokkuudesta ja toimivuudesta, raportti	TTY	Suunnittelu	ARK
3	Peruskoulujen energiatohokkuuteen vaikuttavat tilalliset ja toiminnalliset suunnitteluperiaatteet	Suunnittelu	ARK	Taru Lehtinen, Anna Pajinsaari, Tapio Kaasalainen, Malin Moisio, Markku	Peruskoulut ja energiatohokkuus – Tilallisia ja toiminnallisia suunnitteluperiaatteita, raportti	TTY	Suunnittelu	ARK
4	Monikäyttöisyyttä tukevilla tilaratkaisulla ekologisuutta koulujen arkkitehtisuunnitteluun	Suunnittelu	ARK	Lilja Mustila	Monikäyttöinen koulu – Joustavuudella ekologisuutta tilasuunnitteluun	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	ARK
5	Lähes nollaenergiatavoitteiden vaikutus rakennusten arkkitehtoniseen ilmeeseen ja tilasuunnitteluun	Suunnittelu	ARK	Kaisa Nissilä	Energiatohokas kyläkoulu puusta – Lähes nollaenergiakoulu Laukaalla	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	ARK
6	Ekologisuuden neljän eri näkökulman vertailu ja vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun	Suunnittelu	ARK	Jutta Vuorinen	Tulevaisuuden koulu - Arkkitehtuurin neljä näkökulmaa ekologiseen rakentamiseen	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	ARK
7	Passiivisten suunnitteluratkaisujen vaikutus energiatohokkuuteen ja hiljälämälänsä - arkkitehtisuunnittelun konseptipankki	Suunnittelu	ARK	Taru Lindberg	Vihreä asuinkerrostalo. Selvitys ekologisen asuinkerrostalon passiivisista suunnitteluratkaisista energiatohokkuuden ja hiljälämälänsä näkökulmista	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	ARK
8	Tilojen jakamisella vöhykkeisiin voidaan parantaa rakennusten käyttö- ja energiatohokkuutta	Tilaaminen, Suunnittelu, Käyttö ja huolto	ARK	Taru Lindberg, Tapio Kaasalainen, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Markku Hedman, Juha Vinha	Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency	Advances in Building Energy Research	Tilaaminen, Suunnittelu, Käyttö ja huolto	ARK
9	Ikkunoiden suunnittelun vaikutus energiatohokkuuteen	Suunnittelu	ARK	Tapio Kaasalainen, Taru Lehtinen, Antti Mäkinen, Malin Moisio, Markku Hedman, Juha Vinha	Window design and energy efficiency: a multivariable simulation study in Finnish climates. [Julkaisematon]		Suunnittelu	ARK

COMBI-hankeen tulokortit ja julkaisut
Tilanne 24.1.2019

WP3: Rakenteet ja sisäilma

Numero	Tulokortin otsikko	Sijainti		Taustajulkaisu(t) Tekijä(t)	Otsikko	Julkaisupaikka	Sijainti	
		Prosessi	A/R/T				Prosessi	A/R/T
1	Palvelurakennuskannan kosteus- ja mikrobivauriointuminen	Käyttö ja huolto	RAK	Petri Annala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha	ERI-kaisten kuntarakennusten korjaustarpeet	Sisäilmastoseminaari 2017	Käyttö ja huolto	RAK
				Petri Annala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti & Juha Vinha	Need to repair moisture- and mould damage in different structures in Finnish public buildings	Journal of Building Engineering	Käyttö ja huolto	RAK
				Petri Annala, Matti Hellemaa, Toni Pakkala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Suonketo	Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings	Case Studies in Construction Materials	Käyttö ja huolto	RAK
2	Rakennusosien kosteusptoisuudet kosteus- ja sisäilmateknisissä kuntotutkimuksissa	Käyttö ja huolto	RAK	Petri Annala, Jukka Lahdensivu, Jommi Suonketo, Matti Pentti, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha	Kosteusvaurioiden vakavuus kuntien rakennuksissa	Rakennusfysiikka 2017	Käyttö ja huolto	RAK
				Tero Marttila et al.	Kosteus- ja mikrobivaurion vakavuuden arviointi [Julkaisematon]		Käyttö ja huolto	RAK
3	Terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen	Toteutus	RAK	Tero Marttila, Jommi Suonketo, Petri Annala, Paavo Kero	Terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen, raportti [Julkaisematon]	TTY	Toteutus	RAK
				Tero Marttila, Petri Annala, Jommi Suonketo, Juha Vinha, Anne Hyvärinen	Constructional Guidelines for Implementation of Healthy Building in Remediation in Finland	Indoor Air 2018	Toteutus	RAK
4	Maanvastaisten seinien lämmön- ja kosteudeneristys	Suunnittelu	RAK	Roosa Heiskanen	Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
				Anssi Laukkarinen, Roosa Heiskanen, Juha Vinha	Maanvastaisten seinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta	Rakennusfysiikka 2017	Suunnittelu	RAK
				Filip Fedorik, Roosa Heiskanen, Anssi Laukkarinen, Juha Vinha	Effects of interior thermal insulation on hygrothermal performance of basement walls [Julkaisematon]		Suunnittelu	RAK
5	Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaal ominaisuudet	Suunnittelu	RAK	Maarit Vainio	Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
				Eero Tuominen, Maarit Vainio & Juha Vinha	Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaal ominaisuudet	Rakennusfysiikka 2017	Suunnittelu	RAK
				Olli Tuominen, Eero Tuominen, Maarit Vainio, Juha Vinha	Thermal and Moisture Property Measurements of Calcium Silicate Insulation Boards [Abstract accepted]	CESBP2019	Suunnittelu	RAK
6	Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet	Suunnittelu	RAK	Kari Vantinen	Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
7	Rakennusfysikaalisten kosteusominaisuuksien laboratoriomittausten kehittäminen	Suunnittelu	RAK	Olli Tuominen	Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet ja mittausmenetelmien kehitys [Julkaisematon]	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
				Kari Vantinen, Eero Tuominen & Juha Vinha	Betonin kosteusteknisten materiaal ominaisuuksien määrittäminen	Rakennusfysiikka 2017	Suunnittelu	RAK
8	Kapastiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien kuivumisen seurannassa	Toteutus	RAK	Tuomas Rautima	Kapastiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien ja kipsivaluattiloiden kuivumisen seurannassa [Julkaisematon]	TTY, Diplomityö	Toteutus	RAK
9	Betonirakenteisten sisäkuorielementtien kuivuminen - seurantamittaukset	Suunnittelu	RAK	Tuomas Rautima, Eero Tuominen, Juha Vinha	Behavior of Capacitive Humidity Sensors in Monitoring the Drying of Concrete Walls [Abstract accepted]	CESBP2019	Toteutus	RAK

10	Betonirakenteisten sisäkuorielementtien kuivuminen - laskemallinen tarkastelu	RAK	Lauri Korhonen	Solumuovieristettyjen betonelementtien kuivumistarkastelut	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
			Pauli Sekki ja Juha Vinha	Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomiolla FEM-laskennalla	Rakennustieteiden tutkimuskeskus 2017	Suunnittelu	RAK
			Pauli Sekki ja Juha Vinha	Moisture behavior of highly insulated precast element walls [Julkaisematon]		Suunnittelu	RAK
11	Sisäinen konvektio puhallusvillaaeristeisissä välipölyissä	RAK	Henna Kivioja & Juha Vinha	Hot-box measurements to investigate internal convection of highly insulated loose-fill mineral wool roof structures [Julkaisematon]		Suunnittelu, Määräykset ja sovellusohjeet	RAK
12	Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli	TATE	Joni Pirhonen	Sisälman olosuhdemittaukset uusissa ja korjatuissa palvelurakennuksissa	TTY, Diplomityö	Käyttö ja huolto	TATE
			Antti Kauppinen	Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli	TTY, diplomityö	Käyttö ja huolto	TATE
			Antti Kauppinen, Miikka Kivistö, Joni Pirhonen & Juha Vinha	Paine-erot Pirkanmaan ja Helsingin julkisissa palvelurakennuksissa	Rakennustieteiden tutkimuskeskus 2017	Käyttö ja huolto	TATE
			Miikka Kivistö & Juha Vinha	Air pressure difference measurements in Finnish municipal service buildings	NSB 2017	Käyttö ja huolto	TATE
			Antti Kauppinen, Eero Tuominen, Juha Vinha	Air pressure differences in Finnish schools and daycare centers [Julkaisematon]		Käyttö ja huolto	TATE
13	Sisälman kosteudella ja lampotilan sisälmanolosuhteilla koulussa ja päiväkodeissa	TATE	Vinha et al.	Uusien ja korjattujen palvelurakennusten kiertämisvaikutukset COMBI-tutkimushankkeessa, raportti [Julkaisematon]	Tampereen yliopisto	Käyttö ja huolto	TATE, RAK
14	Sisälman hiilidioksidipitoisuudet kouluissa ja päiväkodeissa	TATE					
15	Sisälman radonpitoisuudet palvelurakennuksissa	TATE					
16	Koulujen ja päiväkotien energiankulutus Suomen rakennuskannassa	TATE	Annu Ruusala	Koulujen ja päiväkotien laskemallinen ja toteutunut energiankulutus	TTY, Diplomityö	Suunnittelu	RAK
17	Koulujen ja päiväkotien E-lukulaskelman mukainen ja toteutunut ostoenergiankulutus	TATE	Annu Ruusala & Juha Vinha	Koulujen ja päiväkotien laskettu ja toteutunut energiankulutus	Rakennustieteiden tutkimuskeskus 2017	Suunnittelu, Määräykset ja sovellusohjeet	RAK
			Annu Ruusala, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha	Energy consumption of Finnish schools and daycare centers and the correlation to regulatory building permit values	Energy Policy	Suunnittelu, Määräykset ja sovellusohjeet	RAK
			Annu Ruusala, Anssi Laukkarinen & Juha Vinha	Comparison between calculated and billed building energy consumption values of schools and daycare centers [Abstract accepted]	CESBP 2019	Suunnittelu, Määräykset ja sovellusohjeet	RAK
18	Taloudellisuuslaskelman yhteiset peruserävaatimet	RAK					
19	KOP-COMBI-kustannusoptimointityökalu	RAK	Juhani Heljo	Excel-työkalu		Suunnittelu	RAK, TATE

COMBI-hankkeen tulokortit ja julkaisut

Tilanne 24.1.2019

WP4: Talotekniikka ja energia

Numero	Tulokortin otsikko	Sijainti		Taustajulkaisut Tekijä(t)	Otsikko	Julkaisupaikka	Sijainti	
		Prosessi	A/R/T				Prosessi	A/R/T
1	Kustannusoptimaaliset lämmitys ja jäähdytysratkaisut palvelurakennuksissa	Suunnittelu	TATE	Jonathan Nyman	Cost Optimal Heating and Cooling Systems in Nearly Zero Energy Service Buildings	Aalto, Diplomityö	Suunnittelu	TATE
				Paula Sankelo, Juha Jokisalo, Jonathan Nyman, Juha Vinha & Kai Sirén	Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate	International Journal of Sustainable Energy	Suunnittelu	TATE
2	Aurinkosähkö kannattaa etenkin vanhaanrakennuksissa	Suunnittelu	TATE	Paula Sankelo	Optimal production and use of solar energy in municipal nearly Zero Energy service buildings	Aalto/KTH, Diplomityö	Suunnittelu	TATE
3	Kustannusoptimaaliset suunnitteluratkaisut palvelurakennuksissa	Suunnittelu	TATE	Paula Sankelo, Juha Jokisalo, Jonathan Nyman, Juha Vinha & Kai Sirén	Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate	International Journal of Sustainable Energy	Suunnittelu	TATE
				Juha Jokisalo, Paula Sankelo, Kai Sirén, Juha Vinha	Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusittuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa.	Rakennustieteellinen 2017	Suunnittelu	TATE
				Juha Jokisalo, Paula Sankelo, Juha Vinha, Kai Sirén & Risto Kosonen	Cost optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate	the 13th REHVA World Congress CLIMA	Suunnittelu	TATE
4	Kuntien oman tuotannon keskittäminen kamattaa vain poikkeustapauksissa	Suunnittelu	TATE	Jukka Paatero, Juha Jokisalo, Juha Vinha	Implementing renewable energy generation for public buildings: the Finnish regulations perspective [Julkaisemat]		Suunnittelu, Määräykset ja ohjeet	TATE
5	Uusiutuvan energian etätuotantoon liittyvät yhteiskunnalliset ja juridiset kysymykset	Määräykset	TATE	Kim Taus, Sirja-Leena Penttinen ja Mikko Kantero	Uusiutuvan energian etätuotantoon liittyvät yhteiskunnalliset ja juridiset kysymykset, raportti	COMBI-hanke	Määräykset	TATE
6	Nykyaikaiset rakennusautomaatiojärjestelmät tarjoavat hyvät mahdollisuudet olosuhteiden hallintaan	Tilaaminen	TATE	Sakari Uusitalo	Hyödynmääntö jo hankittua kiinteistöautomaatiota olosuhteidenmuutoksen ja -hallintaan?	Sisäilmapiirä	Käyttö ja huolto	TATE
				Sami Mikkola	Automaation vaikutus energiatehokkuuteen Pirkkanmaan palvelurakennuksissa	TAMK, opinnäytetyö	Suunnittelu	TATE
7	Verhojen ja kahtimien vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen, CASE: palvelutalo	Suunnittelu	TATE	Jouni Hytönen	Tilaratkaisuiden ja aurinkosuojauksien tutkiminen dynaamisella olosuhteidenmuutoksella	TAMK, opinnäytetyö	Suunnittelu	TATE
8	Energiatehokas valaistus valo-olosuhteiden laatua huoltamalla	Suunnittelu	TATE	Juha-Pekka Aaltonen	Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät. Valaistuksen mallintaminen COMBI-hankkeessa	TAMK, opinnäytetyö	Suunnittelu	TATE
				Sami Nieminen	Energiatehokkaan valaistuksen hankinta COMBI-kohteissa	TAMK, opinnäytetyö	Tilaaminen	TATE

COMBI-hankkeen tulostkortit ja julkaisut

Tilanne 24.1.2019

WP5: Rakentamisen prosessit

Numero	Tulostkortin otsikko	Sijainti		Taatustajulkaisu(t)		Otsikko	Julkaisupaikka	Sijainti	
		Prosessi	A/R/T	Tekijä(t)				Prosessi	A/R/T
1	Sisäilmaongelman koulun korjausvaihtoehtojen ja purkamisen vertailu - Case-tutkimus	Tilaaminen	RAK	Olli Teriö		Energiatehokkaan rakennuksen hankeprosessi	Rakentajan kalenteri 2017		
				Marko Keinanen, Ulrika Uotila, Jaakko Sorri, Olli Teriö & Kalle Kähkönen		Concensus Building in the Pre-design Phase of Building Projects	CIB World Building Congress 2016	Suunnittelu	RAK
				Ulrika Uotila, Olli Teriö, Paavo Kero, Tero Marttila ja Malin Moisio		Sisäilmaongelman koulun korjausvaihtoehtojen ja purkamisen vertailu - case-tutkimus	Rakennusfysiikka 2017	Tilaaminen	RAK
				Jaakko Sorri, Juhani Heljo, Ulrika Uotila, Annu Ruusala		Energiatehokkuusinformaatio palvelurakennuksissa	Rakennusfysiikka 2017	Tilaaminen	RAK
2	Energia- ja ympäristöselvitys hankkeen ohjaukseen	Tilaaminen	TATE	Niko Simola		Hyvän sisäilmaston varmistaminen rakennuksen takuuaikana	TTY, Diplomityö	Käyttöönotto	TATE
				Olli Teriö, Juhani Heljo, Sakari Uusitalo, Pirkko Pihlajamaa		Energia- ja ympäristöselvitys hankkeen ohjaukseen	Rakennusfysiikka 2017	Tilaaminen	RAK
				Joel Tirkkonen		Talotekniikatyöt rakennusurakoitsijan näkökulmasta	TTY, Diplomityö	Toteutus	TATE
				Olli Teriö, Jari Hämäläinen, Ulrika Uotila, Jaakko Sorri ja Arto Saari		Moisture and building processes in Finland	CIB World Building Congress 2016	Toteutus	RAK
3	Tate-toimivuustarkastelu ja toimivuustarkastuskortti	Käyttö ja huolto	TATE	Pirkko Pihlajamaa, Sakari Uusitalo, Olli Teriö		Toimivuustarkastusten merkitys rakennuksen elinkaarelle	Rakennusfysiikka 2017	Käyttö ja huolto	TATE
				Pirkko Pihlajamaa		TAPRE-toimivuustarkastelu ja näkyväksi tehty olosuhtesuranta	Sisäilmapäaja8	Käyttö ja huolto	TATE
				Suvi Virta		Talotekniikan toimivuus viidessä COMBI-hankkeen case-kohteessa, LVI-tekniikkapainotus	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
				Aki Kortetmäki		Talotekniikan toimivuus Pirkkanan palvelurakennuksissa, sähköinen talotekniikka	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
				Saara Vänska		Puhdistettava talotekniikka. Siivouksen ja talotekniikan yhteisvaikutus koulurakennusten sisäilmastoon	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
4	Olosuhtemittauksilla todennetaan tavoitteiden saavuttaminen	Tilaaminen	TaTe	Svanthe Vaskilallio		Rakennusten sisäolosuhteiden mittaaminen ja näkyväksi tekeminen	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
5	Järkevä sähkötehon ja -energian mittaus lisää ylläpidon tehokkuutta	Tilaaminen	TaTe	Jarkko Jalli		Sähköenergian kulutussensuranta Pirkkanan palvelurakennuksissa	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
6	Lämpöenergian kulutusta kannattaa seurata nykyistä tarkemmin	Tilaaminen	TaTe	Matias Pekkanen		Lämpöenergia- ja vesimittaukset Case-kohteissa. COMBI-hanke	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
7	Energiankulutustietojen kerääminen, analysointi ja hyödyntäminen	Käyttö ja huolto	TaTe	Ida Paivomaa		Energiatehokkuus Pirkkanan alueen palvelurakennuksissa	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE
				Lauri Louhi		Energiankulutustietojen analysointi ja hyödyntäminen	TAMK, opimäytetyö	Käyttö ja huolto	TATE

					Sami Montonen	Sähköenergiantalutusten vertailu ja analysointi	TAMK, opinmäärityö	Käyttö ja huolto	TATE
8	Hyvän sisällmäston varmistaminen takuuaikana	Käyttö ja huolto	TaTe	Niko Simola	Hyvän sisällmäston varmistaminen rakennuksen takuuaikana	TTY, Diplomityö	Käyttöönotto	TATE	
9	Korjaushankkeiden sisällmäprosessien kuvaukset	Tilaaminen	TATE	Olli Teräö	Kaaviokuvat	COMBI-hanke			



Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto

Ohjekortisto havainnollistaa yksittäisten suunnitteluratkaisujen merkitystä rakennuskokonaisuudessa.

Arkkitehtonisen laadun keskeiset kriteerit ovat käytettävyys, kestävyys ja viihtyisyys.

Käyttöön perustuvat tila- ja talotekniikkasuunnittelu antavat merkittävät tulokset sekä energiatehokkuuden että arkkitehtonisen laadun näkökulmista.

Ostoenergiankulutuksen ja E-luvun indikaattoreiden kautta energiatehokkuudessa korostuvat talotekniset ratkaisut.

Tausta ja tavoitteet

Euroopan unionin direktiivien myötä myös Suomen rakentamislainsäädäntö energiatehokkuuden osalta muuttuu jatkuvasti vaatien sekä tutkimusta että uudenlaisia suunnitteluratkaisuja jokaiselle suunnittelun ja rakennusprosessin eri osa-alueelle. Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun kohdalla haasteena on, että vaikka arkkitehtuurin tunnustetaan olevan merkittävässä roolissa muodostaen suunnitteluratkaisullaan energiankulutuksen lähtötason, ei sen merkitys juurikaan ilmene laskennallisesti muun muassa taloteknisten ratkaisuiden rinnalla.

Tutkimuksessa tarkasteltiin arkkitehtisuunnittelun kytköksiä energiatehokkuuteen sekä erilaisia energiatehokkuuden laskenta- ja arviointikeinoja arkkitehtuurin näkökulmasta. Tutkimuksen pääasiallisena tavoitteena oli muodostaa *energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto*, joka havainnollistaa yksittäisiä suunnitteluratkaisuja suhteessa rakennukseen kokonaisuutena sekä energiatehokkuuden että laatutekijöiden kautta. Tavoitteena oli tuoda rakennusalan toimijoille totuttujen suunnitteluratkaisujen rinnalle uusia näkökulmia energiatehokkaaseen arkkitehtisuunnitteluun. Ohjekortisto ja suunnitteluratkaisuiden välille esitetty keskinäinen hierarkia toimii suunnittelun apuna energiatehokkaan, laadusta tinkimättömän kohteen suunnittelussa esittäen keskeiset asiat selkeästi, läpinäkyvästi ja kokonaisvaltaisesti.



SUUNNITTELUKOHDE

RAKENTEELLISET OMINAISUUDET



RAKENNUSMASSA



VAIPPA



IKKUNAT



ULKO-OVET

TILAJÄRJESTELY JA KÄYTTÖ



TILAJÄRJESTELY



KÄYTTÖ

OLOSUHEET JA TEKNISET RATKAISUT



VALAISTUS



LÄMMITYS JA JÄÄHDYTYS



KÄYTTÖVESI



ILMANVAIHTO



SÄHKÖ

TONTIN OMINAISUUDET



YMPÄRISTÖ- OLOSUHEET



ULKORATKAISUT

Ohjekortiston sisältö ja rakenne. Ohjekortit on jaoteltu fyysisiin tekijöihin (rakenteelliset ominaisuudet), toiminnallisiin tekijöihin (tilajärjestelyt ja käyttö), olosuhteisiin ja teknisiin ratkaisuihin sekä tontin ominaisuuksiin.



- 1) Visualisointikuva tarkasteltavasta tekijästä
- 2) Sijainti hierarkiapuussa
- 3) Vaikutus ostoenergiankulutukseen
- 4) Vaikutus arkkitehtonisiin laatutekijöihin
- 5) Numeeriset laskentatulokset
- 6) Vaikutus E-lukuun tai käyttötehokkuuteen (tarvittaessa)
- 7) Tarkastelun kuvaus ja huomiot
- 8) Muuta aiheeseen liittyvää pohdintaa
- 9) Aiheeseen keskeisimmin liittyvät ohjekortit

Esimerkkiaukeama ohjekortistosta. Ohjekortti esittää kunkin ominaisuuden keskeiset tulokset.

Tulokset ja johtopäätökset

Energiatohokkuutta arvioitiin tutkimuksessa ostoenergiankulutuksen, E-luvun sekä käyttötehokkuuden (Lindberg et al., 2018) indikaattoreiden avulla. Energiatohokkuuden rinnalle tarkasteluun nostettiin arkkitehtoninen laatu, jota arvioitiin käytettävyyden, kestävyys ja viihtyisyyden pääteemojen kautta.

Laskentatuloksissa korostui kokonaisvaltaisen suunnittelun tärkeys. Energiatohokkuusnäkökulmasta merkittävimmiä suunnitteluratkaisuihin nousivat käyttöön, ilmanvaihtoon ja lämmitykseen liittyvät ratkaisut. Näistä käytön osalta merkittävin toimenpide oli pääkäyttöasteen kasvattaminen, eli rakennuksen täydellä käyttäjämäärällä käytössä olevien tuntien lisääminen. Ilmanvaihdon osalta merkittävimmiä ratkaisuksi nousi ilmanvaihdon ilmapirran säätäminen käytön eli tarpeen mukaisesti esimerkiksi hiilidioksidihajauksen avulla. Lämmityksen osalta lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien ratkaisut sekä sisälämpötila olivat merkittävässä roolissa.

Kun tuloksia tarkasteltiin arkkitehtonisen laadun näkökulmasta, merkittävimmiä osoittautuivat käyttäjien lukumäärään, käyttövyöhykkeisiin sekä ikkunoihin liittyvät suunnitteluratkaisut. Käyttäjien lukumäärällä (henkilötiheys) oli vaikutusta ennen kaikkea viihtyisyyteen, rakennuksen tai tilojen käytettävyyteen ja käyttötehokkuuteen. Käyttövyöhykkeiden (Lindberg et al., 2018) hyödyntäminen, eli rakennuksen pääkäyttötarkoituksen mukaisten tilojen ryhmittely käytön mukaisesti, antoi huomattavia tuloksia niin käytettävyyden, ostoenergiankulutuksen kuin käyttötehokkuudenkin kautta vaatien sekä tila- että talotekniikkasuunnittelulta muuntojoustavuutta. Ikkunoiden osalta niiden tärkein yksittäinen ominaisuus oli ikkunoiden pinta-ala, joka vaikuttaa niin ostoenergiankulutukseen, E-lukuun kuin arkkitehtonisiin laatutekijöihinkin muun muassa luonnonvalon ja auringon lämpöenergian, näkymien sisältä ulos (ulkoyhteys) ja ulkoa sisälle (yksityisyys) sekä tilan tunnun kautta.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Moisio, M., Kaasalainen, T., Lehtinen, T. & Hedman, M. 2018. **Energiatohokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 32.

Lindberg, T., Kaasalainen, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Hedman, M. & Vinha, J. 2018. **Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency.** Advances in Building Energy Research, Taylor & Francis. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1488619>.

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)

Arkkitehti Taru Lehtinen (taru.lehtinen@tuni.fi)



Ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen tilalliset ja toiminnalliset suunnitteluratkaisut

Tehostetun palveluasumisen suunnitteluratkaisut ovat tilarakenteellisesti liian yksipuolisia.

Tilankäyttöä ei enää voida tehostaa yksikkökokoja kasvattamalla tai mitoittamalla tiivistämällä – sommittelullisia perusratkaisuja on uudistettava.

Tausta ja tavoitteet

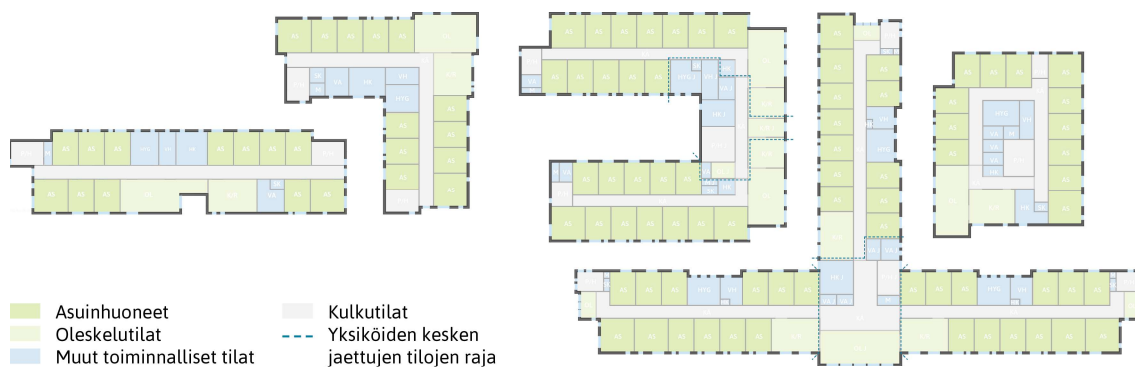
Väestön ikääntymisen ja laitoshoidon vähentämisen myötä Suomessa, kuten laajalti muuallakin, palveluasumisen tarve on voimakkaassa kasvussa. Erityisesti ikärakenteen muutos näkyy jatkuvaa hoitoa tarjoavan tehostetun palveluasumisen kysynnässä. Kasvava kysyntä ei kuitenkaan ole lisännyt tarjonnan monimuotoisuutta. Sen sijaan huonokuntoisimpien pääasialliseksi asumismuodoksi vakiintuneen ryhmäkotimuotoisen tehostetun palveluasumisen suunnitteluratkaisut ovat päätyneet hyvin itseään toistaviksi.

Tutkimuksessa kartoitettiin suomalaisen ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen nykyratkaisujen kehitystarpeita ja -potentiaalia. Päähuomio oli tilallisissa arkkitehtisuunnittelun ratkaisuissa kuten asuinyksiköiden tilarakenteesta ja mitoituksessa sekä näihin liittyvissä toiminnallisissa kysymyksissä. Tarkastelun tavoitteena oli selvittää, miltä osin ja millä keinoin suunnitteluratkaisuja on mahdollista kehittää käyttö- ja täten energiatehokkaammiksi arkkitehtonisesta laadusta tinkimättä. Aineisto koostui yhteensä 30:stä 2000-luvulla rakennetusta tai perusteellisesti korjatusta Helsingissä, Espoossa ja Tampereella sijaitsevasta palveluasumiskohteesta, joihin kuului 130 tehostetun palveluasumisen ryhmäkotiyksikköä.

Tulokset ja johtopäätökset

Tehostettu palveluasuminen toteutetaan nykyisin tavallisesti osana suurempaa palveluasumiskohdetta. Koska asetelma mahdollistaa laajan asiakaskunnan palveluiden keskittämisen yhteen paikkaan, on se palveluiden tarjonnan kannalta tehokas, mutta toisaalta asukkaiden elinpiiriä yksipuolistava ratkaisumalli.

Kuten palveluasuminen on tavallisesti erillään muusta rakennuskannasta, on ryhmäkotimuotoinen tehostettu palveluasuminen tyypillisesti edelleen erillään lopusta rakennuksesta, useimmiten omana kerroksenaan. Ryhmäkotien tilaratkaisut ovat yleissommitelmaltaan hyvin yhteneviä: noin 80 % perustuu keskikäytäväratkaisuun ilman ympärikuljettavuutta. Asukkaiden yhteiset tilat on useimmiten keskitetty yhteen paikkaan yksikössä. Ratkaisu on valvonnan ja täten henkilöstötarpeen kannalta tehokas, muttei tue asukkaiden aktiivisuutta ja sen positiivisia vaikutuksia itsenäiseen toimintakykyyn. Keskitetyn mallin sijaan tulisikin mahdollisuuksien mukaan muodostaa liikkumiseen kannustavia, näköyhteyksin ketjuttuvia itsenäisten tilojen sarjoja. Tällainen hienojakoinen tilakokonaisuus paitsi edesauttaa asukkaiden fyysisen ja henkisen toimintakyvyn säilymistä, myös mahdollistaa tilojen nykyistä tehokkaampaa yhtäaikaista käyttöä.



Ikääntyneiden tehostetun palveluasumisen tyypillisiä tilaratkaisuja. Tyypimallit edustavat teoreettisia, sommitelmaltaan ja mitoitukseltaan keskimääräisiä ryhmäkotikerroksia.

Ryhmäkotien yksikkökoot ovat pääosin jo hieman suomalaista suunnitteluohjeistusta suurempia. Näin ollen tilankäytön tehostamista yksiköiden asukasmäärää lisäämällä ei voida pitää suositeltavana. Myös yksittäisten tilojen mitoitus on jo nykyisellään hyvin kompaktia, joten merkittävää tilankäytön tehostamisen potentiaalia ei neliöitä karsimalla ole tarjolla. Sen sijaan tilajakojen muokattavuutta tukemalla nykyisenlaajuisista tiloista voidaan saada nykyistä enemmän irti: pienemmät, joustavasti laajemmasta kokonaisuudesta jaetut ja edellä kuvastusti sijoitellut tilat mahdollistavat sujuvamman yhtäaikaisen käytön ollen kuitenkin yhdistettävissä tarpeen mukaan. Inhimillisempi tilamittakaava myös auttaa kodinomaisen ilmapiirin luomisessa, mitä on pidetty eräänä keskeisimmistä tavoitteista laitoshoidosta pois pyrittäessä. Lisäksi huolellisella kulkuyhteyksien suunnittelulla voidaan edesauttaa tilojen tarpeenmukaista jakamista eri yksiköiden ja jopa ulkopuolisten käyttäjien kesken.

Tutkimuksessa keskeisimmäksi kehittämisen kohteeksi ja samalla mahdollisuudeksi osoittautuivat tilarakenteen hienojakoisuuden ja joustavuuden lisääminen. Näitä näkökulmia edistävällä huolellisella suunnittelulla voidaan paitsi parantaa käyttötehokkuutta ja vastaavasti konkreettista energiatehokkuutta, myös lisätä asumisviihtyisyyttä.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Kaasalainen, T., Lehtinen, T., Moisio, M. & Hedman, M., 2018. **Ikääntyneiden tehostettu palveluasuminen – Tilallisten ratkaisujen tehokkuudesta ja toimivuudesta.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 33.

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)

Arkkitehti Taru Lehtinen (taru.lehtinen@tuni.fi)

Liittyvät julkaisut

Moisio, M., Kaasalainen, T., Lehtinen, T. & Hedman, M. 2018. **Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 32.



Peruskoulujen energiatehokkuuteen vaikuttavat tilalliset ja toiminnalliset suunnitteluperiaatteet

Peruskoulujen arkkitehtisuunnittelu heijastelee uusien opetusmetodien toiminnallisia vaatimuksia muodostaen perustan energiatehokkuudelle.

2000-luvun kouluja voidaan ryhmitellä seitsemään ryhmään tilallisten ja toiminnallisten ominaisuuksien perusteella.

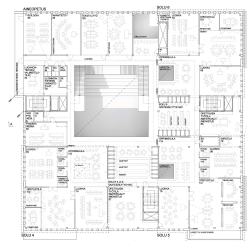
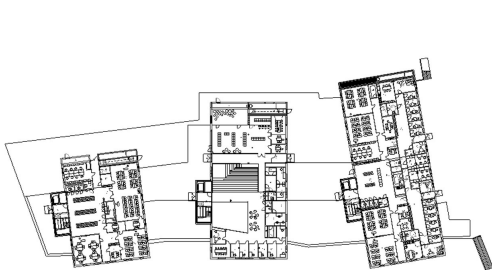
Tausta ja tavoitteet

Koulurakennusten arkkitehtisuunnittelu on kokenut muodonmuutoksen viime vuosina uuden opetussuunnitelman (OPS 2016) ja sen seurauksena uudenlaisen tilasuunnittelun myötä. Lisäksi koulut ovat muiden palvelurakennusten mukana ensimmäisten joukossa ottamassa käyttöön uudet energiatehokkuusmääräykset, sillä kaikkien uusien palvelurakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2019 alusta lähtien. Sen lisäksi, että koulujen on vastattava toiminnallisuudeltaan ja viihtyisyydeltään käyttäjien tarpeisiin, ovat koulurakennukset useilla paikkakunnilla alueen identiteettiä korostavia, arkkitehtoniselta ilmeeltään näyttäviä rakennuksia, joiden ratkaisumallit voivat olla toisiinsa nähden hyvinkin erilaisia. Tutkimuksen tavoitteena oli avata koulurakennusten taustaa, nykytilaa ja tulevaisuutta energiatehokkuuden näkökulmasta tarjoten esimerkkejä ja ratkaisumalleja energiatehokkaaseen koulusuunnitteluun.

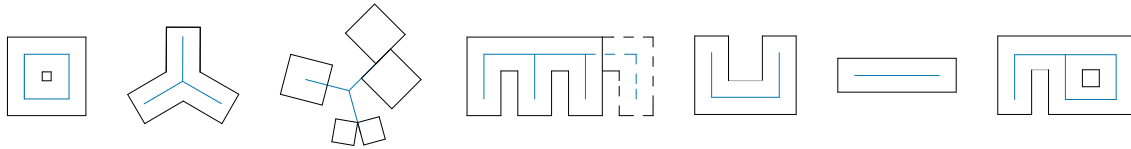
Tulokset ja johtopäätökset

Suomalaisten peruskoulujen nykytilaan johtaneiden tekijöiden selvitys osoitti, että koulujen ratkaisumallit ovat kautta historian olleet hyvin erilaisia kaupungeissa ja maaseudulla. Eron voidaan ajatella värittävän myös peruskoulusuunnittelun tulevaisuutta kaupungistumisen myötä. Toisaalta koulujen arkkitehtisuunnittelu on aina heijastellut uudenlaisia opetusmetodeja ja toiminnallisuutta. Tämä on edelleen havaittavissa uuden opetussuunnitelman myötä kokemusperäisen oppimisen vaatiessa uudenlaisia oppimisympäristöjä, jolloin arkkitehtisuunnittelun on vastattava nykypäivän tarpeisiin. Tämä toiminnallisuuteen perustuva, opetusstrategioiden mukana muuttuva suunnittelu toimii edelleen lähtökohtana koulujen energiatehokkuudelle.

Selvityksen lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin useita 2000-luvun peruskouluja Suomessa ja muualla Euroopassa, joiden perusteella koulurakennukset ryhmiteltiin seitsemään ryhmään esimerkkikohteiden tilallisten ja toiminnallisten ratkaisujen perusteella. Nämä tilalliset ja toiminnalliset ratkaisut muodostavat osaltaan koulurakennusten muotokielen. Ryhmittelyiden avulla voidaan tunnistaa ja hyödyntää energiatehokkuutta parantavia yhtäläisiä piirteitä ja suunnitteluratkaisuja.



Poimintoja tutkimuksessa käytetyistä esimerkkikohteista. Bjørnslettan koulu (2014, Oslo), Opinkäsen monitoimitalo (2015, Espoo) ja Jätkäsaaren peruskoulu (2019, Helsinki).



Esimerkkikohteiden tilallinen ja toiminnallinen ryhmittely. Ryhmittelyjä kuvaavat nimet ovat Noppa, Tähti, Kide, Sormet, Kaari, Puikko ja Hybridi.

Esimerkkikohteiden ja -ratkaisumallien perusteella tutkimuksessa eriteltiin peruskoulujen energiatehokkuuteen vaikuttavia tilallisia ja toiminnallisia suunnitteluperiaatteita. Tällaisiksi suunnitteluperiaatteiksi, joihin tulisi energiatehokkuuden puitteissa kiinnittää tulevaisuudessa enemmän huomiota, osoittautuivat tilatehokkuus, käyttötehokkuus (ostoenergiankulutus/henkilökäyttötunti; Lindberg et al., 2018), tilojen sijoittelu suhteessa toisiinsa ja rakennuksen vaippaan, muuntojoustavuus, uudenlaisten oppimisympäristöjen tuoma avoimuusaste, erilaiset tilavyöhykkeet sekä ulkotilojen hyödyntäminen ja suunnittelu energiaa kuluttavien ratkaisujen osalta. Havaitut suunnitteluperiaatteet osoittivat, että tilalliset ja toiminnalliset periaatteet ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, eikä niiden tarkastelu toisistaan irrallisina ole mielekästä. Lisäksi suunnitteluperiaatteita sovellettaessa käytäntöön korostuvat tilallisten ja toiminnallisten valintojen yhteydessä viihtyisyyden ja käyttökelpoisuuden laatutekijät. Keskeinen viesti on, että peruskoulujen käyttöä ja siihen perustuvaa tilasuunnittelua tulisi edistää energiatehokkuuden parantamiseksi.

Tutkimus osoitti, että peruskoulujen tilalliset ja toiminnalliset tarpeet muuttuvat jatkuvasti aiheuttaen haasteita sekä arkkitehti- että energiasuunnittelulle. Lisäksi peruskoulujen voidaan ajatella olevan jokaisessa suunnittelutapauksessa yksilöitä, joille on haastavaa osoittaa yleispäteviä oikeita suunnitteluratkaisuja ja energiatehokkuuden parantamisen toimenpiteitä. Sen sijaan voidaan esittää joukko ratkaisuja, joista kussakin tapauksessa hyödynnetään mielekkäät vaihtoehdot, sekä ennakoida ja kehittää tulevaisuuden suunnitteluperiaatteita.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Lehtinen, T., Papinsaari, A., Kaasalainen, T., Moisio, M. & Hedman, M. 2018. **Peruskoulut ja energiatehokkuus – Tilallisista ja toiminnallisista suunnitteluperiaatteista.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 34.

Arkkitehti Taru Lehtinen (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)

Liittyvät julkaisut

Lindberg, T., Kaasalainen, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Hedman, M. & Vinha, J., 2018. **Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency.** Advances in Building Energy Research, Taylor & Francis. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1488619>.

Moisio, M., Kaasalainen, T., Lehtinen, T. & Hedman, M. 2018. **Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 32.



Monikäyttöisyyttä tukevilla tilaratkaisuilla ekologisuutta koulujen arkkitehtisuunnitteluun

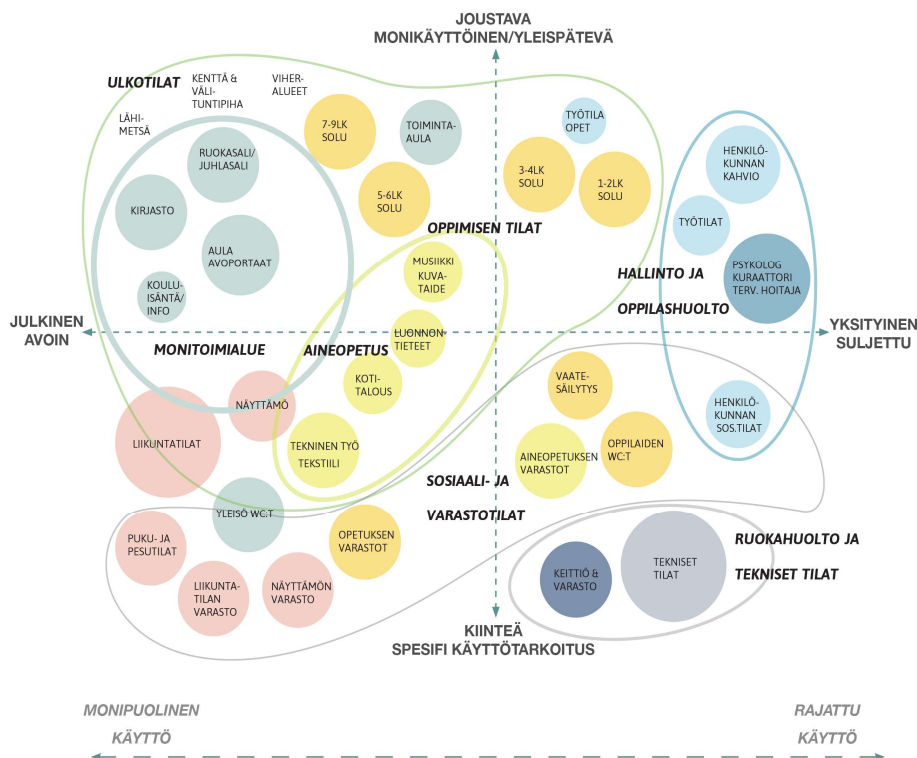
Monikäyttöisyys parantaa koulujen ekologisuutta ja käyttötehokkuutta.

Rakennuksen jakamisella julkisuus-, joustavuus- ja käyttöasteiltaan erilaisiin vyöhykkeisiin voidaan tehostaa taloteknisiä sekä turvallisuuteen liittyviä ratkaisuja.

Tausta ja tavoitteet

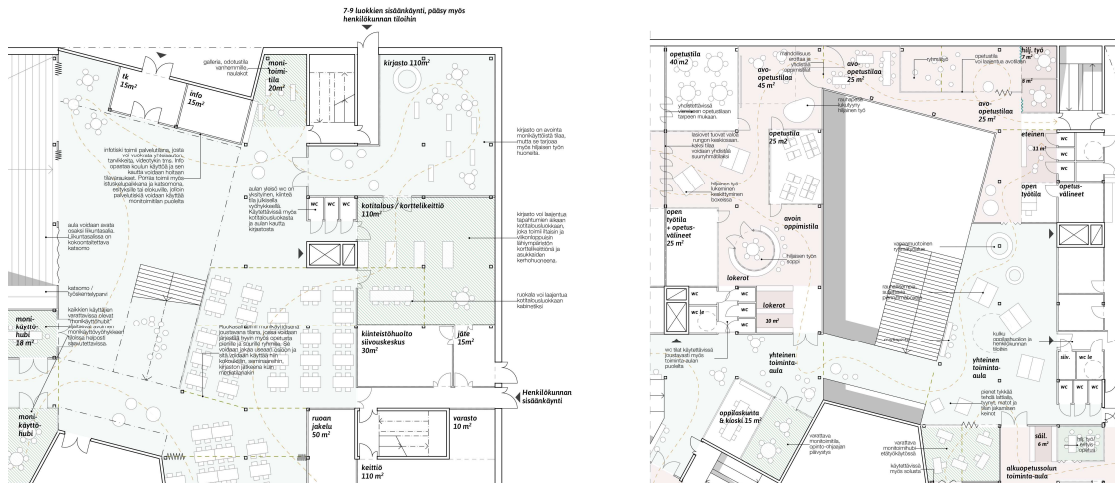
Arkkitehtuurin tilasuunnitteluun ja rakennusten käyttöön liittyvien suunnitteluratkaisujen vaikutuksella energiatehokkuuteen on paljon tunnistamatonta ja hyödyntämätöntä potentiaalia. Tilasuunnittelun ja käytön tarkastelun haasteena on, että niiden vaikutusta energiatehokkuuteen ei aina pystytä havaitsemaan perinteisten energiatehokkuusindikaattoreiden avulla. Lisäksi syntyy ristiriitatilanne, jossa käytön lisääminen lisää myös ostoenergiankulutusta näyttäytyen kannattamattomana. Käytön ja tilasuunnittelun yhteisvaikutusta energiatehokkuuteen voidaan kuitenkin tarkastella niin kutsutun *käyttötehokkuusluvun* avulla, joka saadaan jakamalla ostoenergiankulutus henkilökäyttötunneilla eli henkilöiden lukumäärällä ja ajalla, jonka he viettävät rakennuksessa. (Lindberg et al., 2018.)

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu koulurakennusten monikäyttöisyyttä tilojen käyttötehokkuuden kautta pyrkien energiatehokkuuden parantamiseen. Monikäyttöisyys on muuntojoustavuuden muoto, joka nimensä mukaisesti pyrkii tilojen tai rakennuksen mahdollisimman monipuoliseen käyttöön muuttamatta itse rakennusta tai sen fyysisiä rakennusosia. Monipuolinen käyttö puolestaan voi käsittää eri käyttötarkoituksia tai esimerkiksi ympärivuorokautista toimintaa rakennuksen käyttöaikoja laajentamalla. Lisäksi tutkimuksen tarkoituksena on ollut löytää konkreettisia arkkitehtuurin tilasuunnittelun keinoja monikäyttöisyyden mahdollistamiseksi rakennus- ja tilasuunnittelun mittakaavatasoilla.



Nelikenttä-työkalu.

Rakennusten tilaohjelmien tilat voidaan jaotella nelikenttään tilojen joustavuuden (pystyakseli) ja julkisuuden (vaaka-akseli) perusteella, ja muodostaa työkalun avulla tilavyöhykkeitä arkkitehtuurin tilasuunnittelun yhteydessä.



Vyöhykkeet. Tutkimuksen yhteydessä tehtiin esimerkkisuunnitelma Vartiosaaren kouluksi Helsinkiin vuoden 2015 arkkitehtisuunnittelukilpailun pohjalta. Pohjapiirroksotteissa on esitetty, kuinka vyöhykkeitä voidaan hyödyntää konkreettisesti koulun aula- ja oppimistiloissa.

Tulokset ja johtopäätökset

Tutkimuksessa esitetään uudenaikaiseksi tilasuunnittelun ratkaisumalliksi rakennuksen jakamista julkisuus- ja käyttöasteiltaan erilaisiksi *vyöhykkeiksi*. Vyöhykkeillä tarkoitetaan tutkimuksessa jonkin saman ominaisuuden omaavien tilojen ryhmittelyä vierekkäin. Rakennuksen vyöhykkeisyyden avulla voidaan rajata erilaiset toiminnot tai tilat toisistaan, tai yhdistää useampia tiloja kokonaisuudeksi tarpeen mukaan. Vyöhykkeisyys auttaa taloteknisten ratkaisujen, kuten ilmanvaihdon tai lämmityksen, kohdistamisessa ja tarpeenmukaisten järjestelmien mahdollistamisessa. Koulurakennuksen monikäyttöisyyden kohdalla merkittäviksi tekijöiksi nousevat oppilaiden turvallisuus ja kulunvalvonta, jotka niin ikään ovat ratkaistavissa vyöhykkeiden avulla.

Tutkimuksessa on kehitetty joustavaa arkkitehti- ja tilasuunnittelua varten Nelikenttätökalu, jonka avulla tiloja voidaan ryhmitellä vyöhykkeisiin tilasuunnittelun yhteydessä. Sijoittelemalla tilat nelikenttään akselien osoittamien ominaisuuksien mukaan muodostuvat vyöhykkeet kohteen tilaohjelman mukaisesti. Työkalun avulla voidaan tunnistaa luontevat monikäyttöisyyteen sopivat ja toisaalta rajatun käytön tilat, sekä yhdistää näitä julkisuusvyöhykkeiksi, konkreettisiksi tilaryhmiä rakennuksen pohjapiirroksessa. Lisäksi työkalun avulla voidaan tarkastella tilojen julkisuus- ja joustavuusominaisuuksia suhteessa toisiinsa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Mustila, L., 2017. **Monikäyttöinen koulu – Joustavuudella ekologisuutta tilasuunnitteluun.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Diplomityö, Julkaisu 30. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201705111374>.

Lindberg, T., Kaasalainen, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Hedman, M. & Vinha, J., 2018. **Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency.** Advances in Building Energy Research, Taylor & Francis. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1488619>.

Arkkitehti Taru Lindberg (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)



Lähes nollaenergiatavoitteiden vaikutus rakennusten arkkitehtoniseen ilmeeseen ja tilasuunnitteluun

Tilaohjelmaa arvioimalla ja muuntojoustavuutta hyödyntämällä voidaan pienentää lämmitettyä nettoalaa vaikuttaen merkittävästi rakennuksen energiatehokkuuteen.

Arkkitehtoniseen ilmeeseen vahvasti vaikuttavia energiatehokkuustekijöitä ovat esimerkiksi rakennukseen integroitu omavaraisenergiantuotanto ja runkorakennetekniikka.

Tausta ja tavoitteet

Lähes nollaenergiarakentamisen kriteerien käyttöönotto on Suomessa ajankohtaista Euroopan unionin EPBD-direktiivin täyttämiseksi. Kaikkien uusien rakennusten tulee olla lähes nolla-energiataloja vuoteen 2020 mennessä. Kunnallisten palvelurakennusten, kuten koulujen, kohdalla tämä astuu voimaan jo vuoden 2019 alusta.

1.8.2016 Suomen peruskouluissa otettiin käyttöön uudenlainen opetussuunnitelma, joka korostaa oppilasta aktiivisena toimijana. Uusi opetussuunnitelma vaatii uudenlaista joustavaa tilasuunnittelua mahdollistamaan erilaisia muuttuvia opetus- ja oppimismenetelmiä. Yhdessä lähes nollaenergiatavoitteiden kanssa nämä kaksi lähtökohtaa vaikuttavat koulujen arkkitehtisuunnitteluun merkittävästi niin rakennus- kuin tilasuunnittelunkin tasolla.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu lähes nollaenergiatason ja uudenlaisen opetussuunnitelman vaikutuksia toisiinsa sekä arkkitehtisuunnitteluun. Tutkimuksessa on käytetty rakennustyyppinä koulua, mutta tulokset ovat sovellettavissa muihinkin rakennustyyppeihin energiatehokkuuden osalta. Tavoitteena on ollut esittää konkreettisia arkkitehtuurin ja tilasuunnittelun suunnitteluratkaisuja E-luku- ja aurinkoenergiakalkelmin todistettuina.



Esimerkkisuunnitelma. Tutkimuksessa tehtiin arkkitehtisuunnitelma lähes nollaenergiakouluksi Laukaalle yhteistyöyritys Arkkitehtipalvelu Oy:n hankkeen pohjalta. Visualisointikuvasta näkyvät muun muassa kattoon integroidut aurinkopaneelit ja niiden mukaan polveileva kattomaailma, varjostus sekä puurakenteet.

Tulokset ja johtopäätökset

Uusi opetussuunnitelma aiheuttaa ennen kaikkea muutoksia arkkitehtuurin tilasuunnitteluun, kun taas lähes nollaenergiatavoitteet arkkitehtoniseen ilmeeseen ja muotokieleen. Uuden opetussuunnitelman edellyttämät muuntojoustavat oppimisympäristöt edesauttavat lähes nollaenergiatavoitteita parantaen tilatehokkuutta ja pienentäen lämmitettyä nettoalaa. Samalla uusi opetussuunnitelma kannustaa arvioimaan perinteisen koulurakentamisen tilaohjelmaa, jolloin voidaan löytää myös energiatehokkuuden kannalta kannattavia ratkaisuja.

Uuden opetussuunnitelman aiheuttamat muutokset arkkitehtisuunnitteluun on tutkimuksen perusteella ratkaistavissa pääosin passiivisin ja tilasuunnittelullisin keinoin, mutta energiatehokkuuden saavuttamiseksi tarvitaan näiden lisäksi aktiivisia eli taloteknisiä, sekä rakenteellisia keinoja. Tässä tutkimuksessa päädyttiin aurinkoenergian hyödyntämiseen lähes nollaenergiatason saavuttamiseksi teknisenä ratkaisuna sekä CLT-elementtien hyödyntämiseen rakenteellisena ratkaisuna näiden arkkitehtoniseen ilmeeseen vaikuttamisen vuoksi tarkoituksena kannustaa uudenlaisen, kiinnostavan ja ekologisen arkkitehtuurin luomiseen.

Lähes nollaenergiatason saavuttamiseksi laskennallisesti keskeisiksi ja arkkitehtuuriin vahvasti liittyviksi keinoiksi osoittautuivat ennen kaikkea lämmitetty nettoala, tilaohjelman ratkaisut, rakennuksen massiivisuus, U-arvot ja tiiveys, lämpökuormat sekä uusiutuvan omavaraisenergian tuottojärjestelmä. Visuaalisesti tärkeimmiksi suunnitteluratkaisuihin edellä mainittujen lisäksi osoittautuivat varjostus, viherkatto ja kasvihuoneet. Tehokas lämmöntuottojärjestelmä osoittautui puolestaan laskennallisesti merkittäväksi keinoksi, joka ei kuitenkaan vaikuta rakennuksen arkkitehtoiseen ilmeeseen.

Vaikka rakennuksen arkkitehtoninen ilme ja energiatehokkuus mielletään usein toisistaan irrallisina, arkkitehtuuria voi hyödyntää energiatehokkaassa rakentamisessa uudella tavalla esimerkiksi optimoimalla integroitujen aurinkopaneelien energiantuotto kattokulmauksen, suuntauksen ja rakennuksen muotokielen avulla yhdistäen arkkitehtonisen korkeatasoisuuden ja omaleimaisuuden tavoitteet lähes nollaenergiatavoitteisiin. Samankaltaista uusiutuvien energiantuottojärjestelmien optimoimista ja näkyvyyttä osana arkkitehtonista ilmettä voidaan soveltaa myös muiden energiantuottojärjestelmien kohdalla.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Nissilä, K., 2017. **Energiatehokas kyläkoulu puusta – Lähes nollaenergiakoulu Laukaalle**. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Diplomityö, Julkaisu 28. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ty-201705101369>.

Arkkitehti Taru Lindberg (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)



Ekologisuuden neljän eri näkökulman vertailu ja vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun

Ainoastaan yhden indikaattorin, kuten yksistään energiatehokkuuden, tarkastelu ei ole riittävä pyrittäessä kokonaisvaltaisesti ekologiseen lopputulokseen.

Energiatehokkuus, hiilijalanjälki, elinkaarivaikuttavuus ja elinkaaritehokkuus yhdessä kattavat rakennuksen ekologisen elinkaaren.

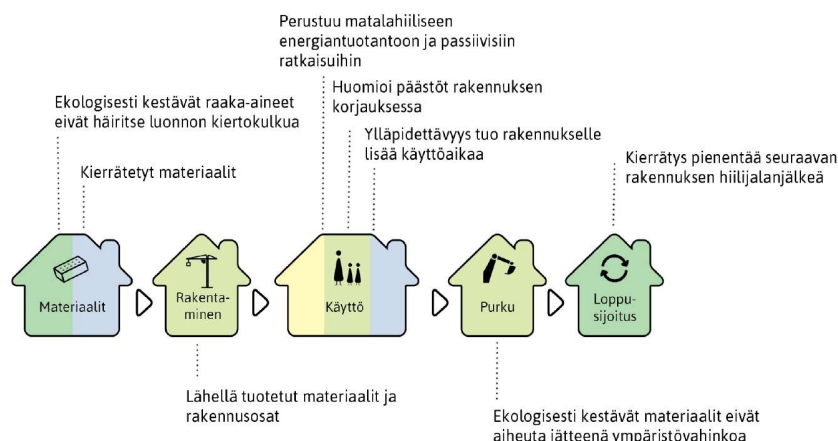
Tausta ja tavoitteet

Energiatehokkuus hallitsee nykyistä ekologisuuteen tähtäävää rakentamista niin kansainvälisesti kuin Suomessakin. Uudet, vuoden 2018 alusta voimaan astuneet kansalliset rakentamismääräykset sekä Euroopan unionin energiatehokkuusdirektiivi (EPBD) vahvistavat suuntausta entisestään. Kuitenkin energiatehokkuus pyrkii viime kädessä vastaamaan ilmaston lämmenemisen haasteeseen sekä muihin laajempiin ympäristöongelmiin, eikä näin ollen toimi itseisarvona. Tutkimuksen lähtökohtana on ollut, että ainoastaan energiatehokkuusnäkökulman huomioiva rakennushanke ei takaa kokonaisvaltaisesti ekologista lopputulosta, vaan voi olla ristiriidassa muiden näkökulmien kanssa.

Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää ekologisen rakentamisen erilaisia keskeisiä näkökulmia, tarkastella ekologisuutta energiatehokkuutta laaja-alaisemmin ja analysoida energiatehokkuuden suhdetta muihin näkökulmiin. Tämän lisäksi tuloksia on pyritty konkretisoimaan arkkitehtuurin suunnitteluratkaisuiksi, joiden kautta on päästy tutkimaan eri näkökulmien synnyttämiä ristiriitatilanteita ja suhteita suunnittelutyössä.

Tulokset ja johtopäätökset

Selvitystyön tuloksena valikoituneet tutkimuksen neljä näkökulmaa ovat *energiatehokkuus*, *hiilijalanjälki*, *elinkaarivaikuttavuus* ja *elinkaaritehokkuus*. Kun energiatehokkuudessa keskitytään energiankulutukseen, hiilijalanjäljessä tarkastellaan kasvihuonekaasupäästöjä. Elinkaarivaikuttavuus tarkoittaa rakennuksen kykyä olla häiritsemättä luonnon kiertokulkua ennen kaikkea elinkaaren alussa ja lopussa, jolloin huomio kiinnittyy ekologisesti kestäviin, pitkäkestoisiin ja kierrätettäviin materiaaleihin. Elinkaaritehokkuus puolestaan pyrkii ottamaan mahdollisimman suuren hyödyn irti luonnonvaroista, joita rakentamiseen on käytetty, ja pidentämään rakennuksen elinkaarta. Yhdessä näkökulmat kattavat ekologisen elinkaaren ja mahdollistavat elinkaarten jatkumon.

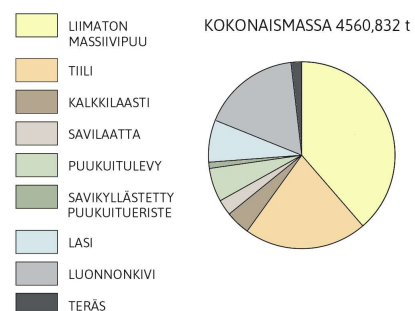


Rakennuksen elinkaaritehokkuus.

Kokonaisvaltainen rakennuksen elinkaaritehokkuus sisältää energiatehokkuuden (keltainen), hiilijalanjäljen (vaaleanvihreä), elinkaarivaikuttavuuden (tummanvihreä) ja elinkaaritehokkuuden (sininen) näkökulmat.

Keskeisenä viestinä on, että yhden näkökulman tarkastelun sijaan tulisi tarkastella useampaa näkökulmaa yhtäaikaaisesti. Koska eri näkökulmien välillä havaittiin ristiriitoja, tulee suunnittelupäätökset arvioida näkökulmille asetetun keskinäisen hierarkian mukaan mahdollisissa ristiriitatilanteissa kussakin projektissa. Hankkeiden keskeiset ekologisuusnäkökulmat ja niiden välinen ensisijaisuus tuleekin päättää jo hankkeen alkuvaiheessa, ennen suunnitteluprosessin käynnistämistä. Tässä tutkimuksessa ensisijaisiksi näkökulmiksi valittiin elinkaarihakkuus ja -vaikuttavuus, sillä ne sijoittuvat laajimmin koko rakennuksen elinkaaren varrelle ja yksittäisen rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle elinkaarten jatkumona. Sen sijaan energiatehokkuudesta on tingitty pyrittäessä ensisijaisesti elinkaarivaikuttavuudeltaan ja -tehokkuudeltaan ekologiseen lopputulokseen. Kokonaisuutena ekologisuus kattaa kuitenkin kaikki esitetyt näkökulmat, jolloin hierarkian määrittelyn tärkeys korostuu lähinnä ristiriitatilanteissa.

Tutkimuksessa havaittuja tilanteita, joissa eri näkökulmat suosivat eri tai jopa vastakkaisia suunnitteluratkaisuja, ilmeni ennen kaikkea materiaalivalintojen kohdalla. Kun hiilijalanjälki, elinkaarivaikuttavuus ja elinkaarihakkuus keskittyvät materiaalivalintoihin, ei energiatehokkuusnäkökulmasta materiaalien merkitys korostu vastaavalla tavalla. Esimerkiksi massiivirakenteet, puu ja tiili, toimivat tästä esimerkkinä. Sen sijaan energiatehokkuutta edistävät uusiutuvat energiantuottojärjestelmät ovat varsin lyhytikäisiä ja omaavat suuren hiilijalanjäljen. Muuntojoustavan tilasuunnittelun nähtiin sen sijaan edistävän jokaista esitettyä neljää näkökulmaa. Merkittävää on, että jokaisen näkökulman yhtäaikaisen täydellisyyden tavoittaminen ei ole mahdollista, vaan aina joudutaan tekemään kompromisseja ja arvottamaan ratkaisuja projektikohtaisesti.



Esimerkkisuunnitelma. Tutkimuksessa tehtiin kokonaisvaltaisesti ekologisen kyläkoulun arkkitehtisuunnitelma Laukaalle yhteistyöyritys Arkkitehtipalvelu Oy:n hankkeen pohjalta. Visualisointikuvasta näkyvät mm. monikäyttöinen aulatila ja puurakenteet. Kuvaajassa on esitettyinä esimerkkisuunnitelmassa käytetyt rakennusmateriaalit ja niiden suhteellinen osuus.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vuorinen, J., 2017. **Tulevaisuuden koulu – Arkkitehtuurin neljä näkökulmaa ekologisuuteen.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Diplomityö, Julkaisu 29. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tti-201705101368>.

Arkkitehti Taru Lindberg (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)



Passiivisten suunnitteluratkaisujen vaikutus energiatehokkuuteen ja hiilijalanjälkeen – arkkitehtisuunnittelun konseptipankki

Tilaohjelman kehittämisellä ja käytön tehostamisella on hyödyntämätöntä potentiaalia sekä energiatehokkuuden että hiilijalanjäljen parantamisessa.

Passiivisilla suunnitteluratkaisuilla on vaikutusta rakennuksen sisäolosuhteisiin.

Hyvään energiatehokkuuteen ja pieneen hiilijalanjälkeen pyrkivät suunnitteluratkaisut ovat toisinaan ristiriidassa keskenään.

Tausta ja tavoitteet

Rakennusala tuottaa yli kolmasosan maailman kasvihuonekaasupäästöistä ja kattaa niin ikään yli kolmasosan maailman energiankulutuksesta. Lisäksi rakennusten on vastattava uudistuvien kansainvälisten ja kansallisten määräysten. Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut paitsi selvittää, niin myös koota yhteen arkkitehtuurin passiivisten suunnitteluratkaisujen vaikutusmahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseksi ja hiilijalanjäljen pienentämiseksi, sillä vastaavanlaista selvitystä ei arkkitehteille ole koostettuna Suomen kontekstissa.

Tulokset ja johtopäätökset

Tutkimustyön tuloksena on kattava selvitys ja sen pohjalta muodostettu rakennustyyppi-riippumaton *konseptipankki*. Konseptipankki on jäsenelty listaus passiivisista suunnitteluratkaisuista ja niiden välisistä suhteista, ja sitä voi käyttää työkaluna ekologisessa arkkitehtisuunnittelussa.

Arkkitehtisuunnittelun kannalta hyödyntämätöntä potentiaalia sekä energiatehokkuuden että hiilijalanjäljen näkökulmista löytyi ennen kaikkea rakennuksen tilaohjelman kehittämisestä, kuten tilavyyhykkeiden suunnittelusta, muuntojoustavuudesta, yhteistilojen hyödyntämisestä, tilojen sijoittelusta suhteessa lämmitettyyn vaippaan sekä tilojen käytöstä. Ekologisen rakentamisen yhteydessä myös kasvillisuuden hyödyntämisellä sekä rakennukseen integroituna että tontille sijoitettuna on visuaalisen symboliikan lisäksi vaikutusta rakennusten energiatehokkuuteen. Passiivisilla suunnitteluratkaisuilla havaittiin olevan vaikutusta rakennuksen sisäolosuhteisiin, kuten sisälämpötilaan, sisäilman laatuun ja valoisuuteen. Energiatehokkuuden ja sisäolosuhteisiin vaikuttamisen lisäksi uusiutuvien energiantuottojärjestelmien integroiminen ja taloteknisten järjestelmien optimoiminen passiivisin suunnitteluratkaisuin voi tuottaa uudenlaista ekologista arkkitehtuuria.

Tutkimuksessa havaittiin, että jotkin suunnitteluratkaisut vaikuttavat sekä energiatehokkuuteen että hiilijalanjälkeen, mutta osalla suunnitteluratkaisuilla on vaikutusta vain toiseen valituista näkökulmista. Esimerkiksi ikkunoiden ja ulko-ovien suunnittelulla on vaikutusta lähinnä energiatehokkuuteen, kun taas materiaalien merkitys korostuu pyrittäessä vähähiilisyyteen. Merkittävänä havaintona on energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen tavoittelun tuottamat ristiriidat: Esimerkiksi energiatehokkuuteen pyrittäessä suositaan paksuja ja tiiviitä rakenteita, kun taas yhä paksummat rakenteet huonontavat rakennuksen hiilijalanjälkeä huomattavasti. Kun ekologisuutta tarkastellaan muistakin kuin energiatehokkuusnäkökulmasta – joka ennemmin tai myöhemmin tulee ajankohtaiseksi – täytyy nykyiset suunnitteluratkaisut kyseenalaistaa pyrittäessä kokonaisvaltaiseen, näkökulmien väliseen tasapainoon.

4.2.2 RAKENNUS

Tilaohjelma

4.2.2 RAKENNUS

Tilaohjelma

	SIJAINTI		RAKENNUS				RAKENTEET		SISÄOLOSUHTEET							
	PIENILMASTO	TONTTI	KÄSIVILLISUUS	TILA-OHJELMA	KOKO	GEOMETRIA	IKKUNAT JA OVET	VARUSTUS	MATERIAALIT	RAKENNUSOSAT	LITOKSET	LÄMPÖTILA	SISÄILMA	VALO	VESI	TALOTEKNISET JÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI
Tehokkuus																
Tilantarpeen arvioiminen ja tilojen lukumäärän minimoiminen				kpl kpl												E H
Porrashuoneen ja käytävöiden tehokkuus rakennuksessa Porrashuoneen koon ja hissien lukumäärän minimoiminen				PRSH PRSH												E H
Hukkaneliöiden minimoiminen asunnossa Käytävien ja aulatilojen minimoiminen, tilojen koon minimoiminen				m² m²												E H
Tilojen käyttöaste Aamu-, ilt- ja päiväkäyttö, ympärivuorokautinen käyttö, työn ja asumisen yhdistyminen																E H ! ?
Tilojen sijoittelu																
Tilojen tehokas sijoittelu suhteessa toisiinsa Liikkuminen rakennuksessa ja asunnossa																E H
Tilojen sijoittaminen vaipan ulkopuolelle Porrashuone, roskakatos, pyörävarasto, osa oleskelutiloista; lämmittämättömät tilat, kuten lasitettu parveke, viherhuone																E H
Ulkotilojen hyödyntäminen Kattoterassi, kattopuutarha, oleskeluviherkatto, viherpiha, pihakansi; ulkotilojen laadukas suunnittelu																E H
Taloteknisten järjestelmien tilavaraukset ja toimiva sijoittaminen Talotekniikkatilat, talotekniikkakulut																E H !
Tilavyöhykkeet																
Lämpövyöhykkeet Lämpimien, puoliämpimien, lämmittämättömien tilojen ryhmittely																E H ?
Puskurivyöhyke pohjoiseen Porrashuone, luhtikäytävä, varastotilat																E
Märkätilavyöhykkeet																E H
Luonnonvalovyöhykkeet																E ?
Yhteistilat																
Asuinkerrostalon yhteistilat Koko rakennuksen, kerroskohtaiset, rajatun ryhmän yhteistilat; harrastetilat, aktiivinen porrashuone, pyykkitupa																E H ?
Joustavuus																
Tilojen monikäyttöisyys Tilojen kalustettavuus																E H
Tilojen muunneltavuus Liikuteltavat rakennusosat ja elementit, rakennuksen fyysinen laajennusmahdollisuus																E H
Huonejakautaman muuttaminen asunnon sisällä Huoneiden yhdistäminen tai pilkkominen, liikuteltavat elementit, oviaukkojen avaaminen																E H
Asuntojakautaman muuttaminen rakennusrungon sisällä Asuntojen yhdistäminen ja pilkkominen																E H ?

Ote konseptipankin esimerkkisivusta: Tilaohjelma.

Vasemmalla palstalla on listattuna passiiviset suunnitteluratkaisut, ja symbolien sijainnit osoittavat mihin kaikkiin yllä otsikoituihin ryhmiin ratkaisulla on vaikutusta. Kuvasta näkee esimerkiksi sen, että arkkitehtuurin tilavyöhykkeet vaikuttavat rakennuksen sisäolosuhteisiin.

Oikealle on merkitty vaikutus energiatehokkuuteen (E), hiilijalanjälkeen (H), osoitettu erityisen huomionarvoisia ratkaisuja (!) sekä hyödyntämätöntä potentiaalia (?).

Lisätietoja ja yhteydenotot

Lindberg, T., 2015. **Vihreä asuinkerrostalo – Selvitys ekologisen asuinkerrostalon passiivisista suunnitteluratkaisuksista energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen näkökulmista.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laitos, Asuntosuunnittelu, Diplomityö, Julkaisu 21. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ty-201511111707>.

Arkkitehti Taru Lindberg (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)



Tilojen jakamisella vyöhykkeisiin voidaan parantaa rakennusten käyttö- ja energiatehokkuutta

Käyttötehokkuuden laskenta täydentää energiatehokkuuden arviointia.

Käyttövyöhykkeillä ja niihin perustuvalla tarpeenmukaisella talotekniikalla on yhdessä merkittävä vaikutus rakennusten energiatehokkuuteen.

Systemaattista käytön suunnittelua tarvitaan suunnitteluprosessin alkuun.

Tausta ja tavoitteet

Energiatehokkuus lasketaan tyypillisesti suhteessa rakennuksen pinta-alaan, mistä suomalainen E-luku (kWh/m²a) toimii esimerkkinä. Pinta-alapohjaiset indikaattorit ovat kuitenkin yksistään riittämättömiä energiatehokkuuden arvioimiseksi jättäen käytön – jota varten rakennukset suunnitellaan – arvioinnin energiatehokkuuden ulkopuolelle. Lisäksi syntyy ristiriitatilanne, jossa käytön lisääminen kasvattaa myös rakennuksen ostoenergiankulutusta kannustaen energiatehokkuusnäkökulmasta käytön minimoimiseen.

Tutkimuksen tavoitteena on ollut löytää keinoja rakennusten käytön ja tilasuunnittelun arvioimiseksi sekä tuomiseksi osaksi energiatehokkuuslaskentaa laajentaen siten vallitsevaa arkkitehtisuunnittelun kannalta yksiulotteista tarkastelutapaa. Lisäksi tavoitteena on ollut löytää konkreettisia tilasuunnittelun keinoja energiatehokkuuden parantamiseksi käytön tehostamisen kautta, laskennallisesti todistettuna mutta toiminnallisesta laadusta tinkimättä.

Tutkimusmenetelmä

Käytön huomioimiseksi energiatehokkuustarkasteluiden yhteydessä on esitetty lukuisia erilaisia laskentatapoja, jotka on tässä tutkimuksessa jaoteltu *itsenäisiin* ja *integroituihin indikaattoreihin* riippuen siitä, sisältävätkö ne pinta-alan (m²) jakajana vai eivät. Kun integroitujen indikaattoreiden etuna on niiden helppo lisääminen osaksi energiatehokkuuden laskentakaavaa, itsenäiset indikaattorit lasketaan energiatehokkuuden rinnalla näyttäen läpinäkyvämmiin yksittäisten tekijöiden vaikutukset tuloksiin.

Tutkimuksessa esitetään indikaattoriksi niin kutsuttu *käyttötehokkuus*, joka saadaan jakamalla rakennuksen ostoenergiankulutus *henkilökäyttötunneilla* alla olevan kaavan mukaisesti:

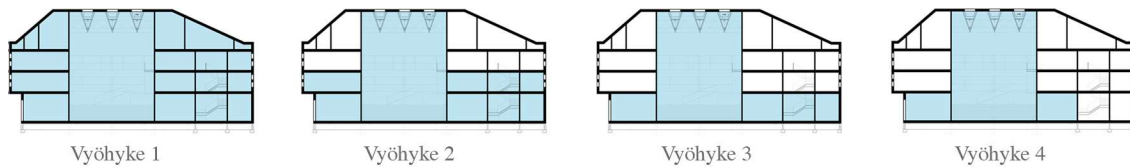
$$\text{Käyttötehokkuus} = \frac{\text{ostoenergiankulutus}}{\text{henkilökäyttötunnit}}, \quad P_{\text{käyttö}} = \frac{E}{\sum (\tau_{\text{hlö}} t_{\text{hlö}})},$$

jossa $P_{\text{käyttö}}$ on käyttötehokkuus (kWh/(hlö*h)), E ostoenergiankulutus (kWh vuodessa), $\tau_{\text{hlö}}$ ihmisten lukumäärä (hlö, ihmisten lukumäärä) ja $t_{\text{hlö}}$ käyttöaika (h, tuntia vuodessa).

Case-kohteena olleen peruskoulun tilat jaettiin neljään eri vyöhykkeeseen niiden käytön perusteella. Vyöhykkeellä tarkoitetaan tilojen ryhmittelyä ominaisuuksiensa, tässä tapauksessa käytön mukaisesti arkkitehtuurin tilasuunnittelussa. Koska Suomen rakentamismääräyksissä huomioidaan vain rakennuksen käyttötarkoituksen mukainen *pääkäyttö* (henkilöiden lukumäärä ja aika), on tässä tutkimuksessa tarkasteltu myös rakennuksen *lisäkäyttöä* eli pääkäytön lisäksi olevaa systemaattista, muun kuin pääkäyttötarkoituksen mukaista toimintaa iltaisin. Taloteknisistä järjestelmistä keskeiseksi on valittu tarpeenmukainen, hiilidioksidipitoisuuden mukaan ohjattu ilmanvaihto, joka mukautuu vyöhykkeiden käyttöön toimien käyttämättömissä tiloissa minimiasetuksilla.

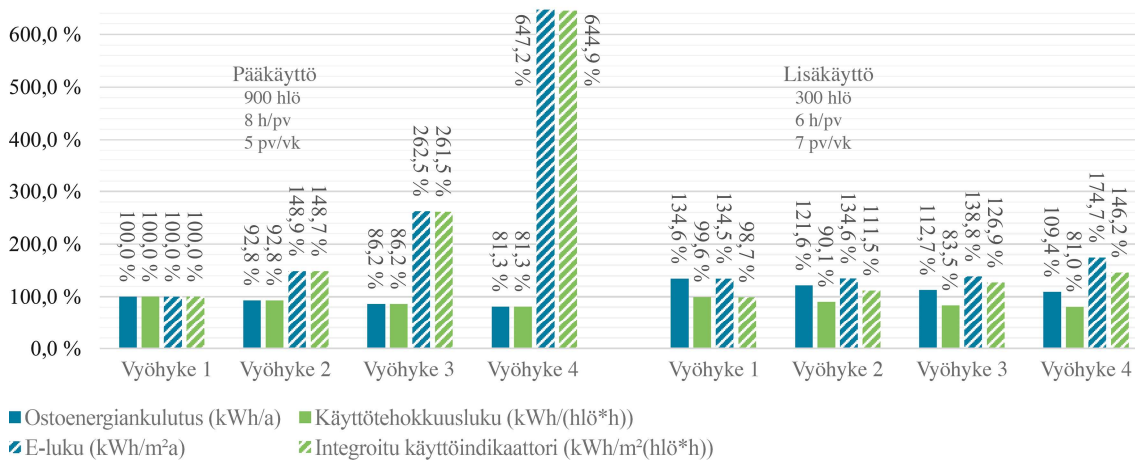
Tulokset ja johtopäätökset

Tulokset osoittavat, että vyöhykkeen pienentyessä pienenevät luonnollisesti myös ostoenergiankulutuksen (kWh/a) ja käyttötehokkuusluvun (kWh/(hlö*h)) eli itsenäisten indikaattoreiden tulokset. Sen sijaan vastaavat integroidut indikaattorit (kWh/m²a ja kWh/m²(hlö*h)) antavat täysin päinvastaiset tulokset osoittaen aikaisemmin mainitun ristiriitatilanteen käytön minimoimisesta. Lisäkäyttövyöhykkeitä tarkastellessa tärkeä huomio on, että kaikki lisäkäyttö ei ole kannattavaa ilman sitä varten suunniteltuja käyttövyöhykkeitä.



■ Käytössä oleva vyöhyke

Tilavyöhykkeet. Case-kohde jaettuna tarkasteltuihin vyöhykkeisiin. Vyöhykkeet ovat samat pää- ja lisäkäytön yhteydessä, mutta henkilöiden lukumäärä ja käyttöaikataulu ovat eri.



Tulokset. Vyöhykkeiden vaikutus itsenäisiin (umpinaiset) ja integroituihin (raidalliset) indikaattoreihin. Huomaa, että lisäkäyttö tapahtuu pääkäytön lisäksi.

Laskenta- ja IDA ICE -energiasimulointitulokset osoittavat, että käyttövyöhykkeiden avulla voidaan parantaa sekä rakennuksen käyttö- että energiatehokkuutta yhdessä CO₂-pitoisuuden mukaan ohjatun ilmanvaihdon kanssa. Energiatehokkuus paranee, kun sitä tarkastellaan suhteessa rakennuksesta saatavaan käyttöön. Kuten lisäkäytön lisäämisen negatiivinen vaikutus ilman käyttövyöhykkeitä ja riittävää lisäkäytön määrää osoittaa, tarvitaan tilasuunnittelun yhteyteen systemaattista *käytön suunnittelua* jo hankkeen alussa. Käytön suunnitteleminen, käytön ajallinen ja henkilömäärällinen tehostaminen sekä vajaakäytön välttäminen, käyttövyöhykkeiden määrittely ja tarpeenmukaisen talotekniikan hyödyntäminen ovat täten suositeltavia suunnitteluratkaisuja palvelurakennusten, kuten koulujen, energiatehokkuuden parantamiseksi.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Lindberg, T., Kaasalainen, T., Moisio, M., Mäkinen, A., Hedman, M. & Vinha, J., 2018. **Potential of space zoning for energy efficiency through utilization efficiency.** Advances in Building Energy Research, Taylor & Francis. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1488619>.

Arkkitehti Taru Lindberg (taru.lehtinen@tuni.fi)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)



Ikkunoiden suunnittelun vaikutus energiatehokkuuteen

Ikkunoiden energiatehokkuusvaikutukset muodostuvat ensisijaisesti syntyvistä lämmitys- ja jäähdytystarpeista.

Energiatehokas ikkunoiden suunnittelu edellyttää aina ratkaisuja, jotka huomioivat ikkunan ominaisuudet kokonaisuutena ja osana koko rakennusta.

Tausta ja tavoitteet

Ikkuna-aukotuksen optimointia on perinteisesti sekä suunnittelussa että tutkimuksessa pidetty yhtenä keskeisimmistä energiatehokkuutta tavoittelevan arkkitehtisuunnittelun keinoista. Suunnitteluongelma on monitahoinen, koska ratkaisussa on samanaikaisesti otettava huomioon muun muassa lämpöhäviöt ja toisaalta mahdollinen liikalämpö sekä luonnonvalon saanti, näkymät ja yksityisyys.

Tutkimuksessa tarkasteluun poimittiin aihepiiriin kirjallisuuden pohjalta sellaisia ikkunoihin liittyviä ominaisuuksia, jotka on havaittu energiatehokkuuden kannalta erityisen merkittäviksi, tai joiden vaikutuksesta ei ennestään ole kattavaa näyttöä. Tavoitteena oli selvittää näiden yksittäisiä ja yhdistettyjä energiatehokkuusvaikutuksia Suomen olosuhteissa. Tarkastellut sijainnit valittiin olosuhteiden erilaisuuden näkökulmasta. Valikoituneet muuttujat arvoineen on esitetty oheisessa taulukossa. Laskenta suoritettiin IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) dynaamisella simulaatio-ohjelmalla ja simulaatiomallina käytettiin 25 m²:n ryhmäkotiasuntoa. Energiankulutusta tarkasteltiin lämmityksen, jäähdytyksen ja valaistuksen ostoenergiankulutusten kautta. Lämpökuormat laitteista, ihmisistä ja auringosta otettiin huomioon lämmitys- ja jäähdytystarpeessa. Tarkastelumallissa ei ole mukana omaa energiantuotantoa.

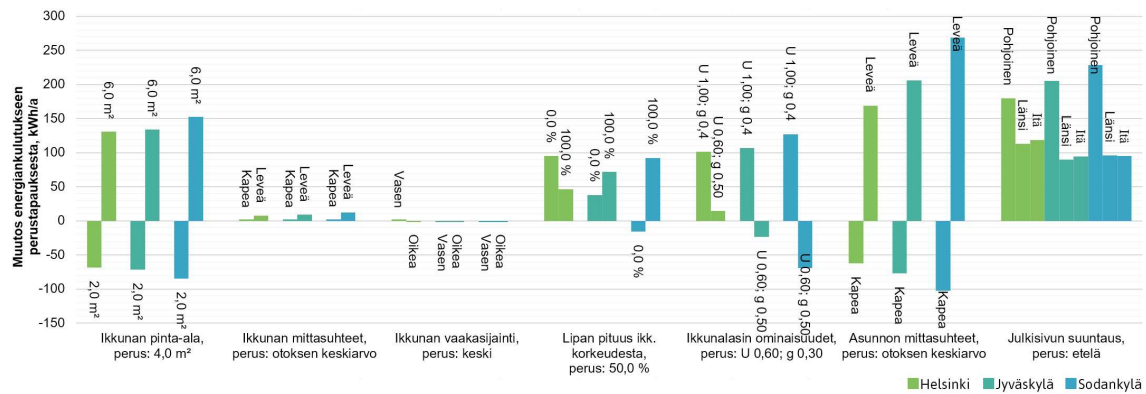
Sijainti	Ikkunan pinta-ala	Ikkunan mittasuhteet	Ikkunan vaakasijainti	Lipan pituus ikk. korkeudesta	Ikkunalasin ominaisuudet	Asunnon mitta-suhteet (L/S)	Julkisivun suuntaus
Helsinki	2,0 m ²	Kapea	Vasen	0,0 %	U 1,00; g 0,40	Kapea (0,49)	Pohjoinen
Jyväskylä	4,0 m ²	Keskimäär.	Keski	50,0 %	U 0,60; g 0,30	Keskimäär. (0,75)	Etelä
Sodankylä	6,0 m ²	Leveä	Oikea	100,0 %	U 0,60; g 0,50	Leveä (1,55)	Länsi
							Itä

Tarkastellut muuttujat ja niiden parametrit. Laskennassa simuloitiin ominaisuuksien kaikki mahdolliset yhdistelmät, yhteensä 8748 laskentatapausta. Taulukossa on korostettu seuraavassa kuvaajassa perustapauksena käytetyt arvot.

Tulokset ja johtopäätökset

Kaikissa laskentatapauksissa suurin osa ostoenergiankulutuksesta muodostui lämmityksestä, jonka osuus kuitenkin vaihteli huomattavasti (47–94 %). Valtaosa lopusta kulutuksesta muodostui jäähdytyksestä, valaistuksen osuuden jäädessä kauttaaltaan verraten vähäiseksi. Suurin vaikutus lämmitystarpeeseen ja täten ostoenergiankulutukseen kokonaisuudessaan oli odotetusti maantieteellisellä sijainnilla: lämmitystarve oli Sodankylässä pienimmilläänkin lähes kaksinkertainen verrattuna Helsingin matalimpaan tulokseen. Merkittävää on, että jäähdytystarvetta ilmeni kaikissa ilmastoissa: jopa Sodankylässä etelään suunnatut, suuret ja varjostamattomat matalan U-arvon ja korkean g-arvon ikkunat nostivat jäähdytystarpeen liki kolmanneksen saman tapauksen vuotuisesta lämmitystarpeesta.

Oheisessa kuvaajassa on esitetty laskentatuloksiin perustuva odotettu vaikutus vuotuisen yhdistettyyn lämmityksen, jäähdytyksen ja valaistuksen ostoenergiankulutukseen, kun kutakin ominaisuutta muutetaan oletusarvosta. Sijainnin jälkeen suurin vaikutus energiankulutukseen oli julkisivun suuntauksella. Lämmitystarpeen keskeytyksen vuoksi useimmissa – muttei kaikissa – energiatehokkaimmissa varianteissa oli ikkuna etelään.



Suunnitteluratkaisujen vaikutus vuotuiseseen ostoenergiankulutukseen. Pylväät kuvastavat keskimääräistä, odotettua muutosta energiankulutuksessa muokattaessa nimettyä ominaisuutta perusarvosta kussakin tarkastellussa sijainnissa.

Ikkunan pinta-alan vaikutus oli merkittävä. Keskimäärin ikkunan koon kasvattaminen lisäsi ostoenergiankulutusta, mutta toisin kuin saattaisi olettaa ei näin tapahtunut kauttaaltaan: kaikista varianteista pienin lämmitysenergiantarve oli niissä, joissa oli suuri tai keskisuuri etelään suunnattu ikkuna eikä lainkaan varjostusta. Suuren jäähdytystarpeen vuoksi nämä kuitenkin jäivät kokonaisostoenergiankulutuksessa kauas kärjestä. Oheisen kuvaajan odotusarvoissa tuloksissa Sodankylä oli ainoa sijainti, jossa varjostuksen puuttuminen täysin näyttäytyi edullisimpana vaihtoehtona. Näin ollen voidaan päätellä energiatehokkaimman ratkaisun muodostuvan kookkaasta, etelään suunnatusta ikkunasta, johon kuuluu tarpeenmukaisesti säädeltävä varjostus.

Asunnon mittasuhteiden muokkaaminen kuvastaa tarkastelussa käytännössä rakennuksen vaipan määrää suhteessa tilavuuteen: julkisivualan lisääntyminen lisää lämpöhäviöitä. Kytös ikkuna- ja tilasuunnittelun sekä massoitteiden välillä on siis oleellista ottaa huomioon kokonaisuudessa. Ikkunan mittasuhteilla ja sijainnilla ei energiatehokkuudellisesta näkökulmasta ollut käytännössä lainkaan merkitystä, joten ratkaisut voidaan tehdä toiminnallisista ja visuaalisista lähtökohdista.

Sen lisäksi, että tulokset yleisesti korostivat ikkunasuunnittelun merkittävyyttä energiatehokkuudessa, nostivat ne erityisesti esiin kokonaisvaltaisen tarkastelun tärkeyden: mikään yksittäinen suunnitteluratkaisu ei vaikuttanut kautta linjan yhdellä tavalla, vaan kaikki riippuivat muista ominaisuuksista. Optimaalisen energiatehokasta ikkunasuunnittelua ei siis voida tehdä yleisluontoisin, kontekstista irrotetuin ohjein.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Kaasalainen, T., Lehtinen, T., Mäkinen, A., Moisio, M., Hedman, M. & Vinha, J. 2018. **Window design and energy efficiency: a multivariable simulation study in Finnish climates.** (To be published.)

Arkkitehti Tapio Kaasalainen (tapio.kaasalainen@tuni.fi)

Arkkitehti Taru Lehtinen (taru.lehtinen@tuni.fi)

Liittyvät julkaisut

Moisio, M., Kaasalainen, T., Lehtinen, T. & Hedman, M. 2018. **Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin laboratorio, Asuntosuunnittelu, Julkaisu 32.



Palvelurakennuskannan kosteus- ja mikrobivaurioituminen

Peruskorjattavat rakennukset ovat kosteus- ja mikrobivaurioiden näkökulmasta moniongelmaisia, joka asettaa korjaussuunnitteluun haasteensa.

Perusteellinen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus on onnistuneen korjaushankkeen perusedellytys.

Tausta ja tavoitteet

Rakennusosien lisälämmöneristämiseen ja energiatehokkuuden parantamiseen voi väärin toteutettuna liittyä riski kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan heikentymisestä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida korjaushankkeiden lähtötilannetta palvelurakennusten kosteus- ja mikrobivaurioitumisen näkökulmasta.

Tulokset ja johtopäätökset

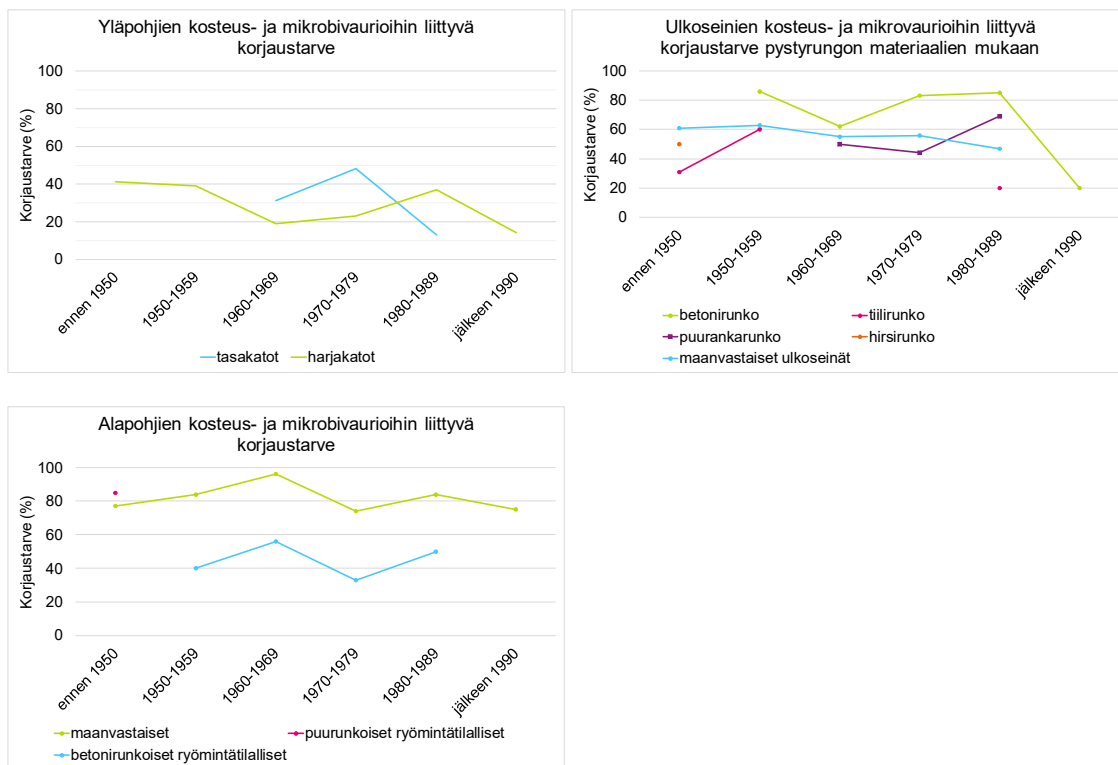
Tutkimusaineistona käsiteltiin 168 palvelurakennuksen kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen raporttia. Aineiston perusteella noin 70 % korjaushankkeista käyttäjien kokemat sisäilmaongelmat olivat yhtenä korjaushankkeita käynnistävänä tekijänä. Kaikissa raporteissa kuntotutkimuksen syytä ei ole kerrottu, mutta todennäköisesti sisäilmakysymykset ovat laajemminkin korjaushankkeissa mukana. Palvelurakennusten peruskorjauksissa joudutaan siis lähes poikkeuksetta tekemisiin kosteus- ja mikrobivaurioiden kanssa.

Korjausten käynnistyessä rakennukset ovat moniongelmaisia, aineiston perusteella lähes kolmessa rakennusosassa esiintyy kosteus- ja mikrobivaurioihin liittyvää korjaustarvetta. Tarkasteltaessa vain sotien jälkeistä rakennuskantaa oli tulos aineistosta selkeä: mitä vanhempi rakennus sitä enemmän korjaustarvetta on. (Annala et al. 2017a ja 2018)

Vaikka rakennukset ovatkin moniongelmaisia, niin kosteus- ja mikrobivauriot koskevat keskimääräisesti suhteellisen pientä osaa rakennusosien kokonaismäärästä. Vaurioitumisaste vaihteli 2,4-16,3 % välillä, mutta vaihtelu rakennusten välillä oli merkittävää, joten jokainen rakennus tulee käsitellä yksilöllisesti. (Annala et al. 2017b).

Kosteus- ja mikrobivaurioita rakennuskantaan syntyy moninaisista syistä. Vaurioiden taustalla on mahdollisesti puutteita rakennusosan suunnittelussa, työmaatoteutuksessa sekä ylläpidossa. Lisäksi vaurioitumiseen voi liittyä ulkoinen normaalista poikkeava rasiutilanne.

Lisälämmöneristämisen kannalta alla olevissa kuvissa on esitetty ulkovaipparakenteissa esiintyvä kosteus- ja mikrobivaurioihin liittyvä korjaustarve. Kaikkien rakennusosien osalta tulokset on esitetty alkuperäisessä julkaisussa (Annala et al. 2018). Tutkimusaineistossa oli edustettuina kaikki tavanomaiset suomalaisissa palvelurakennuksissa käytetyt rakennetyypit. Aineiston perusteella kaikissa näissä rakennetyypeissä esiintyy kosteus- ja mikrobivaurioihin liittyvää korjaustarvetta.



Ulkovaipparakenteiden kosteus- ja mikrobivaurioihin liittyvä korjaustarve.

Tutkimuksen havainnot rakennusten moniongelmaisuuudesta, kosteus- ja mikrobivaurioiden pistemäisyydestä sekä vaurioitumisen vaihtelusta rakennusten välillä alleviivaavat perusteellisen kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen tärkeyttä osana peruskorjaushankkeiden valmistelua. Korjaussuunnittelussa taas tulee panostaa rakennusosien rakennusfysikaalisen toimivuuden varmistamiseen muun kokonaishallinnan ohella.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M. 2016. Practical Experiences from Several Moisture Performance Assessments. Building Pathology and Rehabilitation, Vol 5, Recent Developments in Building Diagnosis Techniques. Delgado, J.M.P.Q. (Ed.). Book chapter, pp. 1-20.

Annala, P., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Laukkanen, A., Vinha, J., 2017a. *Eri ikäisten kuntarakennusten korjaustarpeet*. Sisäilmayhdistys raportti 35, ss. 39-44. Sisäilmastoseminaari 15.3.2017 Helsinki.

Annala, P. J., Hellemaa, M., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M. 2017b. *Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings*. Case Studies in Construction Materials 6 (2017) 103-108.

Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Vinha, J. 2018. *Need to repair moisture- and mould damage in different structures in Finnish public buildings*. Journal of Building Engineering 16 (2018) 72-78.

Tohtorikoulutettava Petri Annala (petri.annala@tuni.fi)



Rakennusosien kosteuspitoisuudet kosteus- ja sisäilmateknisissä kuntotutkimuksissa

Kaikissa rakennusosissa kosteuspitoisuus voi nousta haitallisen korkeaksi ja mahdollistaa siten mikrobikasvun.

Eniten korkeita kosteuspitoisuuksia on kuntotutkimuksissa mitattu maanvastaisista rakennusosista.

Tausta ja tavoitteet

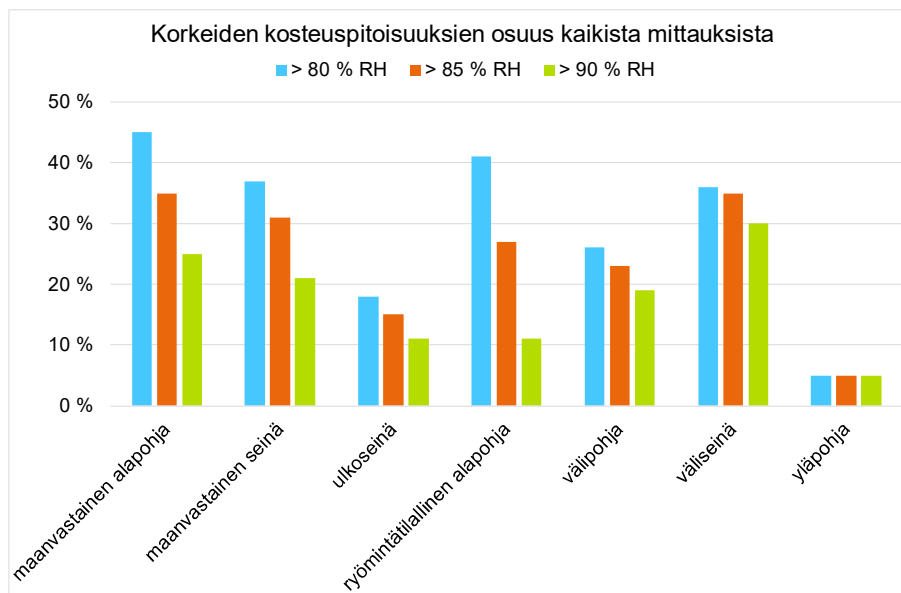
Aiemmissa tutkimuksissa (Annala et al. 2017a, 2017b ja 2018) on todettu, että kosteus- ja mikrobivaurioita esiintyy kaikissa suomalaisissa palvelurakennuksissa käytetyissä tavanomaisissa rakenneratkaisuissa. Vaurioiden lukumäärä ei kuitenkaan yksistään riitä korjaustarpeen ja kiireellisuuden arviointiin, vaan kosteus- ja sisäilmateknisten kuntotutkimusten tavoin myös laajemmassa mittakaavassa on syytä tarkastella vaurioiden vakavuutta. Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida rakennusosien kosteuspitoisuutta kuntotutkimuksissa suoritettujen kosteusmittausten avulla.

Tulokset ja johtopäätökset

Tutkimusaineistona oli käytettävissä kosteusmittausten (porareikä- ja viiltomittausten) tuloksia 291 rakennuksesta. Mittauksia näissä kohteissa oli suoritettu kaikkiansa 3113 kappaletta. Tutkimusaineistossa on edustettu kaiken ikäiset palvelurakennukset sekä yleisesti Suomessa käytetyt rakenteet. (Annala et al. 2017c)

Kosteus- ja sisäilmatutkimuksissa on käytettävissä useita eri tutkimusmenetelmiä. Aineiston perusteella kosteusmittauksista suurin osa, yhteensä 70 %, on kohdistettu maanvastaisiin alapohjiin sekä maanvastaisiin ulkoseiniin. Jakaumat eri rakennusosien ja aikakausien välillä on esitetty yksityiskohtaisemmin julkaisussa Annala et al. (2017c).

Rakennusosasta riippuen 5-45 % kaikista suoritetuista kosteusmittauksista ovat johtaneet tulokseen, jossa rakennusosan kosteuspitoisuudeksi porareikästä todetaan yli 80 % suhteellinen kosteus. Eniten korkeita kosteusarvoja on mitattu alapohjarakenteista sekä maanvastaisista seinistä. Yläpohjasta on harvoin mitattu korkeita suhteellisia kosteuksia. Alla olevassa kuvassa on lisäksi esitetty rakennusosittain yli 85 % ja 90 % suhteellisen kosteuden osoittaneen kosteusmittausten osuus kaikista mittauksista rakennusosittain jaoteltuna. Mittaustulosten tulkintaa hankaloittaa se, ettei kuntotutkimusraporteissa ole kerrottu mittausten syytä edes vertailumittausten osalta. Tämä katsotaan raporttien puutteeksi.



Korkeaan mittaustulokseen johtaneiden mittaustulosten osuus kaikista rakennusosaan kohdistuneista mittauksista.

Tutkimuksen perusteella ei voida osoittaa, niin sanottua kosteusturvallista rakennusosaa, vaan kaikkiin rakenteisiin voi kertyä ulkoisista lähteistä niin paljon kosteutta, että rakennusosan ja materiaalien kosteus- ja mikrobivaurioituminen on mahdollista.

Tutkimuksen tulokset antavat lähtötietoja rakennusfysikaalisesti toimivien ja kosteusturvallisten rakennusosien suunnitteluun niin uudis- kuin korjausrakentamisessa. Rakenteen vikasietoisuuden arviointia suositellaan osaksi rakennesuunnittelua. Aihepiiri vaatii kuitenkin lisätutkimuksia, ennen kuin yhteisesti on hyväksytty kriteerit siitä, mikä on kohtuullinen taso vikasietoisuuden osalta.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Annala, P. J., Hellemaa, M., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M. 2017a. *Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings*. Case Studies in Construction Materials 6 (2017) 103-108.

Annala, P., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Laukkanen, A., Vinha, J., 2017b. *Eri ikäisten kuntarakennusten korjaustarpeet*. Sisäilmayhdistys raportti 35, ss. 39-44. Sisäilmastoseminaari 15.3.2017 Helsinki.

Annala, P., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Vinha, J., Laukkanen, A. 2017c. Kosteusvaurioiden vakavuus kuntien rakennuksissa. Rakennusfysiikka 2017. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut: 24-26.10.2017, Tampere. Vinha J., & Kivioja, H. (toim.). Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, Vol. 1, ss. 135-140.

Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Vinha, J. 2018. *Need to repair moisture- and mould damage in different structures in Finnish public buildings*. Journal of Building Engineering 16 (2018) 72-78.

Tohtorikoulutettava Petri Annala (petri.annala@tuni.fi)



Terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen

Terveen talon toteutuksen kriteereillä pyritään vähimmäisvaatimuksia korkeampaan sisäilmaston laatuun ja kosteuteen liittyvien riskien minimointiin. Korjausrakentaminen on usein uudisrakentamista kompleksisempää ja siihen tarvitaan omat yhtenäiset selkeät kriteerit.

Tausta ja tavoitteet

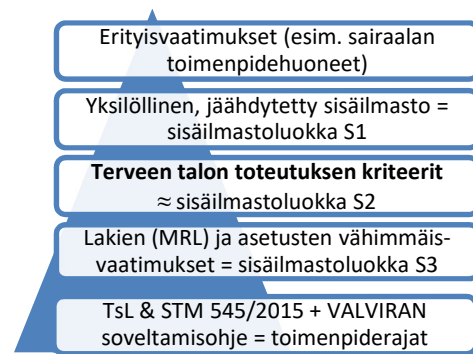
Tekesin Terve talo teknologiaohjelma tuotti useita julkaisuja ohjelmavuosinaan 1998-2002 ja loppuraportin vuonna 2003. Ohjelman jälkeen Rakennustietosäätiö julkaisi laajalti tunnetut ja käytetyt ohjetiedostot (RT-kortit): RT 07-10805 Terveen talon toteutuksen kriteerit ja ohjeet toimitilarakentamiselle 2003 sekä RT 07-10832 Terveen talon toteutuksen kriteerit ja ohjeet asuntorakentamiselle 2004.

Uudisrakentamiseen keskittyneitä vanhoja kriteerejä on sovellettu myös korjausrakentamiseen. Yritykset ovat kehittäneet omia tarkastuslistoja, laatujärjestelmiä, toimintamalleja sekä ohjeita. Kuivaketju10 on pitkälle kehitetty toimintamalli, jolla pyritään estämään kosteusvaurioiden syntyminen rakennusprosessin kaikissa eri vaiheissa. Toimintamalli on kehitetty uudisrakentamiseen, mutta sitä voidaan soveltuville osin käyttää korjausrakentamiseen samoin kuin keuhkolla 2018 julkaistua päivitettyä sisäilmastoluokitustakin. Syksyllä 2018 päivitetty RTS-ympäristöluokitus sitoo yhteen edellään mainittujen lisäksi myös muita yhteisiä hyviä kotimaisia käytäntöjä. Luokitusta hakeville auditoitaville korjausrakentamisen hankkeille on asetettu myös omia erillisiä arviointikriteerejä. Korjausrakentaminen sisältää lähes aina uudisrakentamiseen kuulumattomia työvaiheita, kuten rakenteiden purkamista, joten uudisrakentamiseen kehitettyjen toimintamallien soveltaminen saattaa jättää keskeisiä osia alueita huomioimatta.

Kooltaan monet korjausrakentamishankkeet ovat pieniä eikä niiden esiselvityksiin tai laadunvarmistukseen huomata panostaa riittävästi, mutta epäonnistuuksaan korjaukset voivat paisua jättimäiseksi mediakohuksi. Korjaushankkeisiin ryhtyvillä ei välttämättä ole riittävä osaamista eikä aikaa perehtyä laajoihin oppaisiin, joita korjausrakentamiseenkin on tehty ja tehdään parhaillaan. Kiireisellä toteutusaikataululla jotkin jälkikäteen selvältä vaikuttaneet terveelliseen toteutukseen vaikuttavat toimenpiteet ovat saattaneet unohtua. **Matalan kynnyksen maksuton tarkastuslista voi auttaa välttämään virheitä, joista aiheutuisi merkittäviä kustannuksia tai sisäilmaongelmia myöhemmin.** Tietoa tiivistämällä voidaan saavuttaa parempaa vaikuttavuutta rakentamisen yleiseen laatuun ja ohjata tarkempaa tietoa tarvitsevia viimeisimmän tiedon lähteille.

RT-korttien käyttö on suosittua osaltaan juuri tiivistetyn tiedon ansiosta ja vanhoja ohjekortteja käytetään yhä, vaikka alalla on tapahtunut paljon kehitystä. Siitä syystä RT-korttien määrittelemän kriteeristön päivittäminen aloitettiin Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER) hankkeessa. COMBI-hankkeessa työ tarkentui vastaamaan todellista tarvetta, eli täyttämään muiden toimintamallien jättämän aukon ja määrittelemään yhtenäiset korjausrakentamista erikseen koskevat käytännönläheiset toimenpiteet terveen talon toteuttamiseen. **Tavoitteeksi otettiin tiivis kaikkiin kohteisiin sopiva ja helposti päivitettävä tietopaketti tukemaan muita jo olemassaolevia toimintamalleja.**

Päivitystyössä on säilytetty alkuperäistenkin kriteerien periaate eli niillä pyritään lakisääteisiä vähimmäisvaatimuksia parempaan sisäilman laatuun ja kosteuteen liittyvien riskien minimointiin. Käytännössä kriteerien määrittelemä tavoitetaso vastaa suunnilleen sisäilmastoluokkaa S2, kun taas sisäilmastoluokka S3 täyttää maankäyttö- ja rakennuslain (MRL) sekä terveydensuojelulain (Tsl) vähimmäisvaatimukset. STM:n asetus 545/2015 ja sen soveltamisohje määrittelee toimenpiderajat, joiden alittuessa korjaushankkeeseen on viimeistään ryhdyttävä.



Kuva 1. Sisäilmaston tavoitetasot suhteessa terveen talon toteutuksen kriteereihin sekä lakeihin ja asetuksiin.

Kriteerien käyttö ja keskeisimmät päivitykset

Päivitystyön tuloksena COMBI-yleisöseminaarissa 2019 julkistetaan terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen tarkastuslistan muodossa. Kriteerit ovat yleispäteviä, joten kaikki kriteerit tulee täyttää kaikissa kyseisiin kriteereihin sitoutuviissa rakennushankkeissa. Rakennushankkeeseen ryhtyvä kuitenkin itse päättää, kuinka valvoo kriteerien täyttämistä. Tarkastuslistan hyödyntäminen sopii esimerkiksi hankkeen kosteudenhallinnan valvonnasta vastaavalle henkilölle, jonka nimeäminen on ollut pakollista vuoden 2018 alusta lähtien osana Ympäristöministeriön asetuksen edellyttämää kosteudenhallintaselvitystä.

Aikaisempaan verrattuna kriteereistä on karsittu: tulkinnan- ja harkinnanvaraisuutta, keskenään päällekkäisiä asioita ja otsikoita, nykyrakentamisessa itsestään selviä tai muuten epäolennaisia asioita, yksityiskohtaisia ohjeita ja yksittäistapauksia, joita ei voida yleistää kaikkiin rakennuksiin. Korjausrakentamisen erityispiirteinä päivityksessä on lisätty esimerkiksi kuntotutkimuksiin ja purkutöihin liittyviä kriteerejä. Korjaushankkeen keskeisimpiä onnistumistekijöitä ovat pätevät toimijat asiantuntijasta rakennustyöntekijään, suunnitellut ja dokumentoidut laadunvarmentamistoimet sekä kuntotutkijan ja korjaussuunnittelijan välinen tiedonsiirto.

Päivityksessä on karsittu alkuperäisen kriteeristön IV-painotteisuutta. Ilmanvaihtosuunnittelun ohjeistamisessa on tapahtunut merkittävästi kehitystä ja niin asunto- kuin muuhunkin rakentamiseen on olemassa erillisiä oppaita. Päivitetyissä kriteereissä ei anneta mitoitus- eikä raja-arvoja, vaan viitataan lähteisiin, joista ne löytyvät. Ilmanvaihdon samoin kuin rakennustekniikan osalta kriteereihin on sisällytetty konkreettisia asioita, jotka työryhmä on arvioinut korjausrakentamishankkeiden kannalta keskeisimmiksi riski- tai ongelmakohtiksi.

Kriteerit julkaistaan tutkimusryhmän internetsivulla, missä ne ovat helposti päivitettävissä. Kehitysehdotukset viedään kriteereihin mahdollisuuksien mukaan. Suppean kriteeristön käyttö edellyttää asiantuntemusta eikä se korvaa kattavampia ohjeita tai toimintamalleja.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Marttila, T., Suonketo, J., Annala, P., Kero, P., 2019. **Terveen talon toteutuksen kriteerit korjausrakentamiseen.** Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka Tampere

Tohtorikoulutettava Tero Marttila (tero.marttila@tuni.fi)



Maanvastaisten seinien lämmön- ja kosteudeneristys

Jo pelkkä vesihöyryn diffuusio maaperästä riitti synnyttämään homeen kasville otolliset olosuhteet useisiin sisäpuolelta lämmöneristettyihin maanvastaisiin seiniin.

Maanvastaisten seinien lämmön- ja kosteudeneristys on suositeltavaa tehdä kantavan rakenteen ulkopuolelle.

Sisäpuolista lisälämmöneristystä käytettäessä ohut, kapillaarisesti kosteutta tehokkaasti siirtävä lämmöneristemateriaali oli suositeltavin vaihtoehto.

Tausta ja tavoitteet

Maanvastaisten seinien rakennusfysikaaliseen toimintaan vaikuttavat useat eri kosteuslähteet. Rakenteiden tulee kestää sisäilmasta, ulkoilmasta ja maasta siirtyvän vesihöyryn aiheuttaman kosteuskuormituksen lisäksi myös rasitukset mahdollisista pohja-, pinta-, sade- ja roiskevesistä.

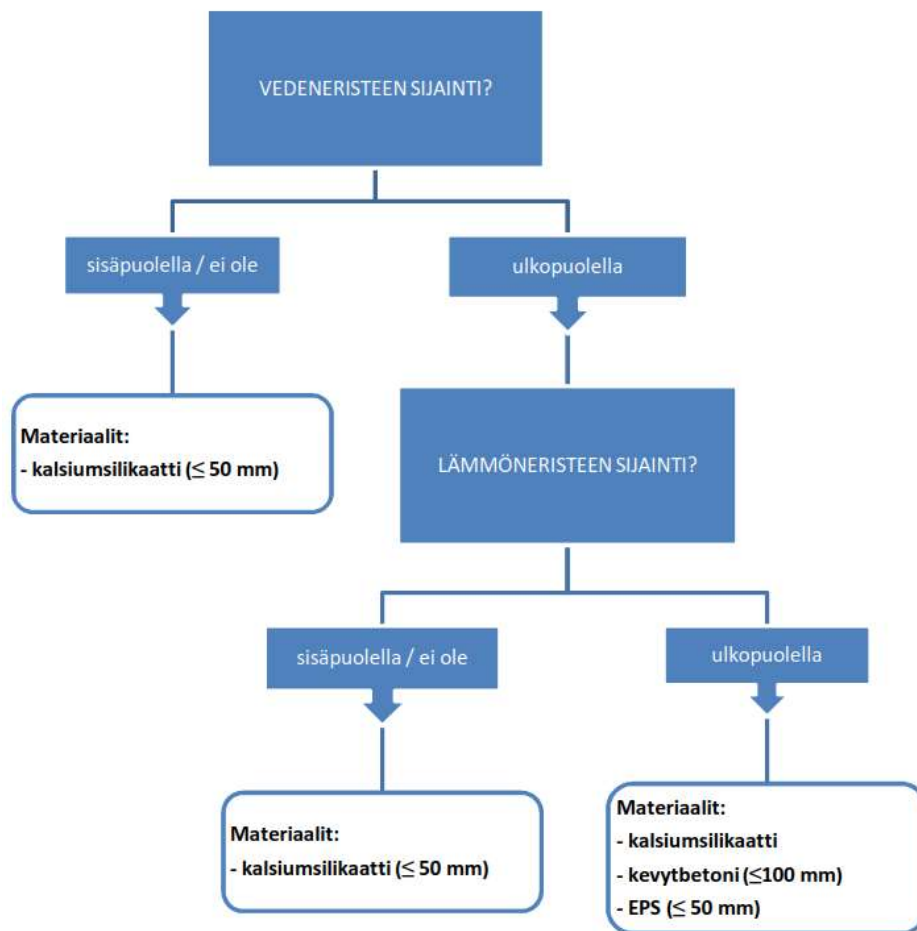
Tulokset ja johtopäätökset

Laskennallisten tarkastelujen perusteella kosteutta voi siirtyä maanvastaisiin rakenteisiin haitallisessa määrin nestemäisen veden lisäksi pelkästään myös diffuusiolla. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta ensisijaisen tärkeää on estää ylimääräisen kosteuden pääsy rakenteisiin niin hyvin kuin mahdollista. Tätä varten on suositeltavaa huolehtia salaoja- ja kapillaarikatkokerroksen hyvästä toiminnasta rakenteen ulkopuolella, minkä lisäksi suurin osa maanvastaisten rakenteiden lämmöneristyksestä ja vesihöyrynvastuksesta tulisi aina ensisijaisesti olla kantavan rakenteen ulkopuolella.

Jotta kosteutta ei siirtyisi maasta myöskään anturan kautta kantavan seinän alaosiin, tulisi anturan alapuolisen kapillaarikatkokerroksen lisäksi harkita käytettävän myös vesihöyryn ja veden siirtymisen katkaisevaa kerrosta anturan ja seinän välissä. Uudiskohteissa tämä voi olla esimerkiksi bitumikermi, mutta korjauskohteissa on asennuksen rajoitusten vuoksi tarpeen käyttää esimerkiksi injektointia.

Kapillaarisesti vettä siirtävä eriste kantavan rakenteen sisäpinnassa mahdollisti tilanteen, jossa kosteutta siirtyi kapillaarisesti huonetiloihin päin. Tällöin suhteellinen kosteus kantavan seinän ja sisäpuolisen lisälämmöneristeen rajapinnassa laski, jolloin rakenteen rakennusfysikaalinen toiminta parani. Tämä käyttäytyminen eroaa esimerkiksi tavanomaisista mineraalivilva- ja solumuovieristeistä, jotka eivät pysty siirtämään kosteutta kapillaarisesti samalla tavoin. Jotta kosteutta voi siirtyä kantavasta rakenteesta sisäpuoliseen kalsiumsilikaattieristeeseen, tulee näiden välille muodostaa kapillaarinen yhteys sopivan kiinnityslaastin avulla.

Korjausrakentamisessa vanhat materiaalikerrokset vaikuttavat korjausrakennusratkaisun valintaan. Rakennusfysikaalisen toimivuuden kannalta suositeltavin vaihtoehto uudisrakentamisen lisäksi myös korjausrakentamisessa, on tehdä maanvastaisten seinien lämmön- ja kosteudeneristys kantavan rakenteen ulkopuolelle käännettynä rakenteena. Sisäpuolisen lisälämmöneristeen valintaa on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Lämmön- ja kosteudeneristysten valinta maanvastaisille seinille. Perustuksiin kohdistuvan kapillaarisen vesikontaktin vaikutukset tulee tarvittaessa selvittää erikseen.

Jos kivrakenteisessa kantavassa seinässä ei ole ulkopuolista lämmön- tai kosteudeneristystä, mutta ei myöskään pohjavesikosketusta, on rakenteen sisäpuolisena eristysenä mahdollista käyttää enintään 50 mm paksua kalsiumsilikaattieristettä, jonka vedenimeytymiskerroin $A_w \geq 1,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$. Jos rakenteen ulkopuolella on olemassa toimivat lämmöneriste- ja kosteussulkukerrokset, on mahdollista käyttää tapauskohtaisesti myös muita sisäpuolisia lämmöneristysratkaisuja.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Heiskanen, R., 2016. **Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttv-201606014206>.

Fedorik, F., Heiskanen, R., Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2019. Moisture safety of additional thermal insulation in basement walls. *Manuscript writing in process*.

Tohtorikoulutettava Anssi Laukkarinen (anssi.laukkarinen@tuni.fi)

Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet

Kalsiumsilikaattilevyjä voidaan käyttää kosteusteknisesti haastavien rakenteiden lisälämmöneristämiseen tietyin reunaehdoin.

Kalsiumsilikaattilevyjen materiaaliominaisuudet ovat pääosin samankaltaiset, mutta poikkeusten vuoksi tuotevalinta on tehtävä valittujen materiaaliominaisuuksien luokarvojen perusteella.

Tutkimuksessa mitatut materiaaliominaisuuksien arvot eivät poikkea merkittävästi valmistajien ilmoittamista.

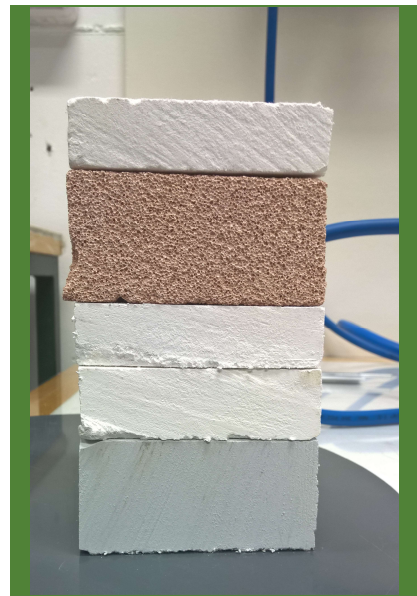
Tutkimuksen tausta

Kalsiumsilikaattilevy on materiaaliominaisuuksiltaan potentiaalinen materiaali moniin haastaviin rakenteisiin. Kalsiumsilikaattilevyn kosteustekninen toiminta poikkeaa tavanomaisista lämpöpöä eristävästä materiaaleista ja tätä poikkeavuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi maanvastaisen seinien sisäpuolisessa lisälämmöneristämisessä (Heiskanen 2016).

Kosteusteknisesti haastavien rakenteiden suunnittelussa turvaututaan yhä useammin mallinnusohjelmiin. Mallinnuksen tulosten luotettavuuden ehdoton edellytys on oikein määritetyt materiaaliominaisuudet. Tässä tutkimusosiossa määritettiin Suomen markkinoilla saatavissa olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet ja verrattiin niitä valmistajien ilmoittamiin ja mallinnusohjelmien kirjastoista löytyviin arvoihin.

Tutkitut materiaalit ja materiaaliominaisuudet

Tutkimuksia varten hankittiin kalsiumsilikaattilevyjä (kuva 1) suoraan valmistajilta tai maahantuojoilta. Toimintatavalla haluttiin varmistaa, että tutkittavaksi saadaan mahdollisimman uusia tuotteita. Yksi tutkittu levy on valkokalkkihydraattilevy ja se on otettu tutkimukseen mukaan, koska sitä on markkinoitu kalsiumsilikaattilevyn edulliseksi korvaajaksi tietyissä rakenteissa.



Kuva 1. Tutkitut levyt ylhäältä lukien: Promasil 1000, Kasil Pura, Kasil E, Epatherm, Skamotec 225,

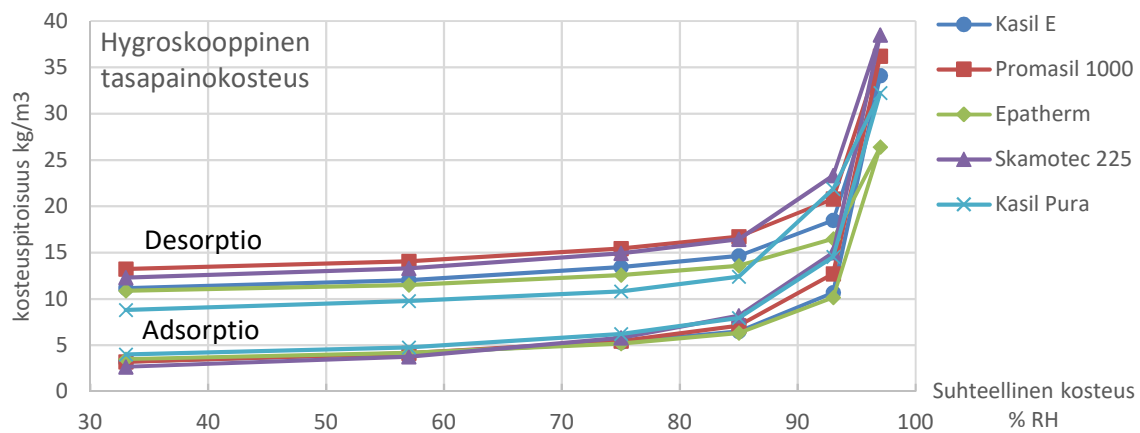
Tutkittuja materiaaliominaisuuksia ovat kuivatiheys (taulukko 3.1), vesihöyrynläpäisevyys, vedennimeytymiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. Ominaisuudet määriteltiin tapauskohtaisen standardin mukaisesti. Joidenkin materiaaliominaisuuksien osalta standardin mukaisessa mittausmenetelmässä havaittiin puutteita ja tarvittaessa mittausmenetelmiä kehitettiin tutkimuksen edetessä (Tuominen 2018).

Tutkimustulokset

Mittaustulokset noudattivat pääasiassa valmistajan arvoja, jotka ovat yhteneviä muualla kirjallisuudessa ja mallinnusohjelmien kirjastossa esitettyihin arvoihin. Erot valmistajien ilmoittamissa ja mitatuissa materiaaliominaisuuksissa ovat pääasiassa niin pieniä, että valmistajan ilmoittamien materiaaliominaisuuksien perusteella on mahdollista valita oikea tuote, jos vaaditut ominaisuudet ovat tiedossa.

Taulukko 1. Tutkittujen kalsiumsilikaattilevyjen paksuus, kuivatiheys, vesihöyrynläpäisevyys, vedenimeytymiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti.

Materiaali	h [mm]	ρ_{dry} [kg/m ³]	$\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	W_{cap} [kg/m ³]	λ [W/mK]	c_p [J/kgK]
Kasil E	25	253	8,14	1,182	832	0,076	860
Promasil 1000	25	232	7,98	1,199	839	0,071	790
Epatherm	30	236	9,32	1,288	837	0,070	830
Skamotec 225	50	227	10,8	0,643	700	0,072	820
Kasil Pura	50	133	11,7	0,137	347	0,053	910



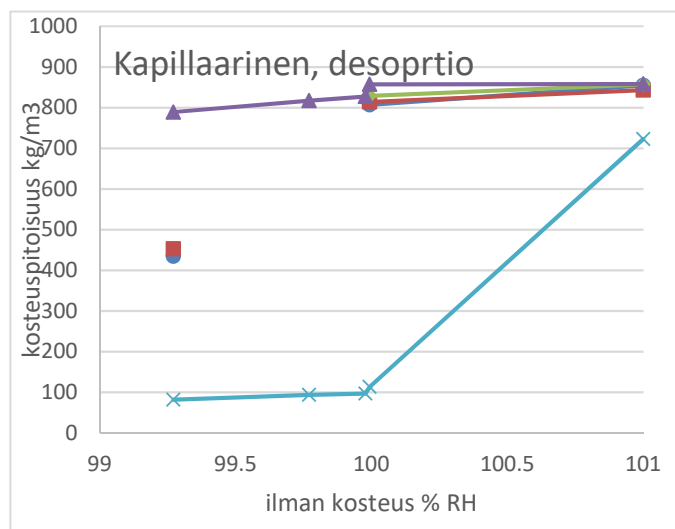
Lisätietoja ja yhteydenotot

Heiskanen, R., 2016. Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttt-201606014206>.

Vainio, M., 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttt-201611244761>

Tuominen, E. & Vainio, M & Vinha, J, 2017. **Suomessa markkinoilla olevien kalsiumsilikaattilevyjen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet.** Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka.

Projektitutkija Eero Tuominen (eero.tuominen@tuni.fi)



Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet

Eri betonilaatujen ja eri valmistajien betonien tutkituissa rakennusfysikaalisissa kosteusominaisuuksissa oli eroja, ja eroavaisuuksia oli myös verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin.

Betoni on materiaali, jonka ominaisuudet voivat myös muuttua merkittävästi ajan kuluessa ja ympäristön vaikutuksesta.

Tausta ja tavoitteet

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arvioiminen on tullut yhä haasteellisemmaksi ja mallinnusohjelmien käyttö on yleistynyt. Jotta mallinnus olisi luotettavaa, tulee laskennassa käytettyjen materiaaliominaisuuksien vastata mahdollisimman hyvin oikeissa rakenteissa käytettyjä materiaaleja. Tässä tutkimusosiossa määritettiin Suomen asuin- ja palvelurakennuksissa paljon käytettyjen sisäkuori- ja ontelolaattabetonilaatujen rakennusfysikaalisia kosteusominaisuuksia.

Tutkitut materiaaliominaisuudet

Määritettyjä materiaaliominaisuuksia ovat veden imeytymis- ja tunkeutumiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, maksimikosteuspitoisuus, vesihöyrynläpäisevyys sekä hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä.

Tulokset ja johtopäätökset

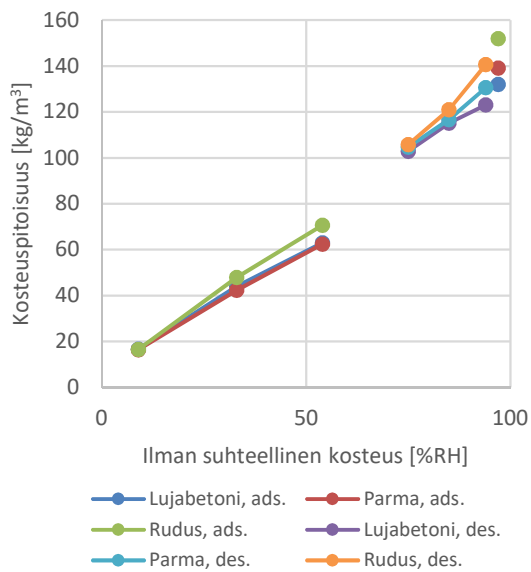
Eri betonilaatujen ja eri valmistajien betonien tutkituissa rakennusfysikaalisissa kosteusominaisuuksissa oli eroja, ja eroavaisuuksia oli myös verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin. Sen perusteella voidaan todeta, että eri betonilaatujen rakennusfysikaalisia kosteusominaisuuksia olisi syytä määrittää laajemmin, ja että riippuvuudet betonin koostumuksen ja esim. valmistuksessa käytettyjen lisäaineiden ja kosteusominaisuuksien välillä olisi hyvä selvittää.

Materiaali	h [mm]	ρ_{dry} [kg/m ³]	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	B_w [mm/s ^{0,5}]	w_{cap} [kg/m ³]	δ_v [m ² /s]
OL-Lujabetoni	20	2209	8,0E-04	-	105	7,78E-08
OL-Parma	20	2241	5,2E-03	0,0809	120	1,35E-07

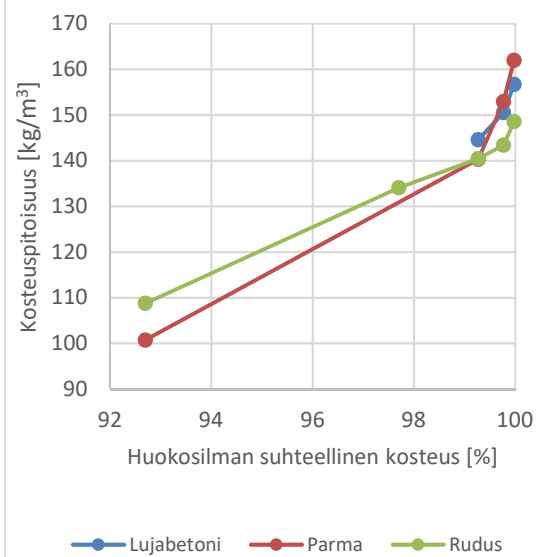
Materiaali	Ikä [d]	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	B_w [mm/s ^{0,5}]	w_{cap} [kg/m ³]
SB-Lujabetoni	245	1,44E-03	4,53E-02	131,1
	370	1,20E-03	4,14E-02	103,0
SB-Parma	147	1,65E-03	4,32E-02	130,1
	278	2,39E-03	1,02E-01	97,3
SB-Rudus	215	5,65E-03	9,11E-02	134,5

Materiaali	ρ_{dry} [kg/m ³]	δ_v [m ² /s]
SB-Lujabetoni	2104,9	8,48E-08
SB-Parma	2190,3	1,30E-07
SB-Rudus	2318,3	2,43E-07

Hygr. tasapainokosteus,
sisäkuoribetonit

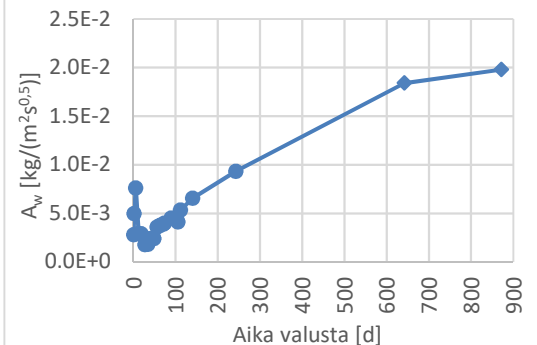


Kap. tasapainokosteus,
sisäkuoribetonit



Betoni on materiaali, jonka ominaisuudet voivat myös muuttua merkittävästi ajan kuluessa ja ympäristön vaikutuksesta. Esimerkiksi veden imeytymisominaisuuksien havaittiin tutkitulla sisäkuoribetonilla muuttuvan edelleen yli kahden vuoden jälkeen, mutta kehitys oli erilaista eri tavalla jälkihoidetuilla betoneilla. Betonin ikä ja käyttöolosuhteet tulisivat ottaa huomioon materiaaliominaisuuksia arvioitaessa.

Veden imeytymiskertoimen
kehittyminen ajan funktiona



Lisätietoja ja yhteydenotot

Vainio, M., 2016. **Kalsiumpilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tyy-201611244761>.

Vänttinen, K., 2017. **Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201711282276>.

Vänttinen, K & Tuominen, E. & Vinha, J, 2017. **Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen**. Rakennusfysiikka 2017: Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut.

TULOSSA: Tuominen, O., 2019. **Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet ja mittausmenetelmien kehitys**. Diplomityö. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka.

Tutkimusapulainen Olli Tuominen (olli.tuominen@tuni.fi)

Rakennusfysikaalisten kosteusominaisuuksien laboratoriomittausten kehittäminen

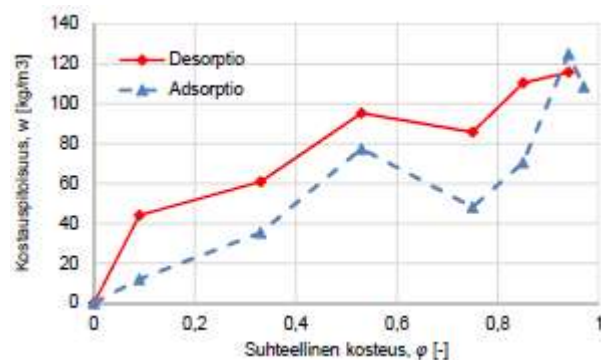
Standardien mukaiset menetelmät eivät sovellu kaikilta osin sellaisinaan betonien materiaaliominaisuuksien mittaamiseen.

Tausta

Laboratoriomittausten yhteydessä todettiin, että painelevy- ja tasapainokosteuskoetta määrittävien standardien mukaiset menetelmät eivät sovellu kaikilta osin sellaisinaan betonien materiaaliominaisuuksien mittaamiseen. Ongelmallisia olivat etenkin kokeiden pitkä kesto ja tasapainottumisen todentaminen.

Tulokset, tasapainokosteuskokeen kehittäminen

Betonin tasapainokosteuskokeiden nopeuttaminen onnistui parhaiten tekemällä erilliset koesarjat jokaiseen kosteustasoon. Viimeisessä tutkimusosiossa käytetyillä ohuemmillä koekappaleilla tasapainottuminen kesti edelleen hyvin pitkään, mutta erillisillä koesarjoilla koetta voitiin joka tapauksessa nopeuttaa. Murskatuilla koekappaleilla koeajat lyhenivät keskimäärin noin puoleen verrattuna 15–16 mm paksuisiin kokonaisiin kappaleisiin, mutta tulokset eivät vastanneet kokonaisten tuloksia ja käyrät eivät olleet odotetun muotoisia (kuva 1).



Kuva 1. Rudoksen betonista murskatuilla koekappaleilla määritetyt tasapainokosteuskäyrät. Murskaaminen nopeuttaa mittauksia, mutta tulokset poikkesivat ehjän betonin ominaisuuksista

Painonnoususta piirrettyjen kuvaajien avulla voitiin arvioida koekappaleiden riittävä tasapainottuminen. Toisen ja kolmannen tutkimusosion tasapainokosteuskokeiden painonnousukuvaajista nähdään, että sopiva painonmuutoksen raja-arvo on betoneilla 0,1 %/vrk sijaan ennemmin 0,001 %/vrk suuruusluokassa.

Ohuemmillä koekappaleilla kokeiltiin tehdä kokeet kuivaamatta niitä aluksi uunissa, jolloin betonin rakenne säilyi muuttumattomana. Osin tästä johtuen myös mitatut tasapainokosteuspitoisuudet olivat niillä aiemmin mitattuja alhaisempia. Uunikuivaamista olisi ylipäätään syytä välttää betonin materiaaliominaisuuksia määritettäessä.

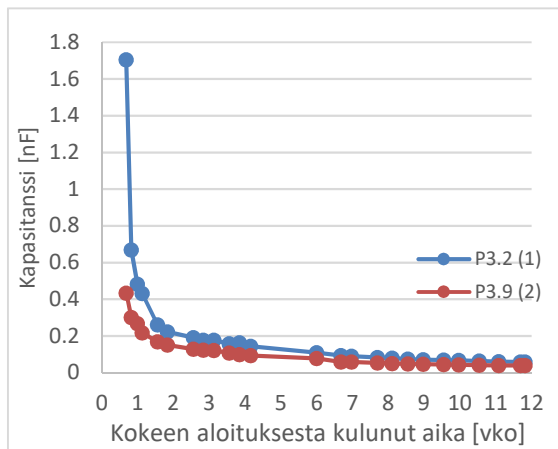
Tulokset, painelevykokeen kehittäminen

Kapasitanssimittauksilla todettiin olevan mahdollista seurata tasaantumisen etenemistä. Selkeimmät kapasitanssin kuvaajat saatiin 100 baarin kammiossa tehdyistä kokeista (kuva 3). Painelevykokeiden sopivaksi kestoksi 6–7 mm paksuisilla betonikoekappaleilla arvioitiin kapasitanssimittausten perusteella n. 1–2 kk, painetasosta riippuen.

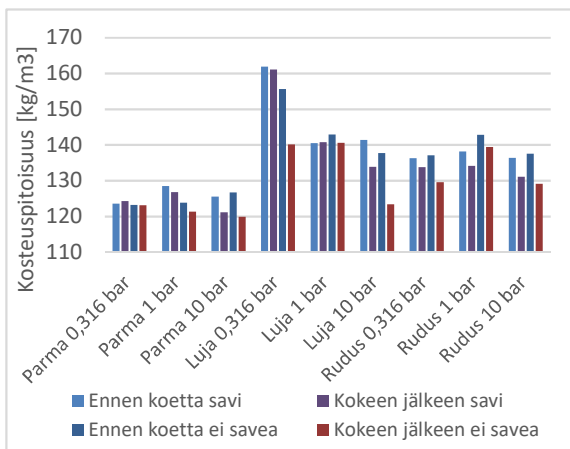


Kuva 2. Kapasitanssineulakappaleita 100 baarin painekammiossa.

Koekappaleiden siirtäminen painetasosta toiseen todettiin huonoksi menetelmäksi, koska niiden pinta kuivuu herkästi siirron yhteydessä. Kapillaarinen yhteys säilyy paremmin, kun käytetään jokaisessa kokeessa vakuumikyllästettyjä kappaleita. Kaoliinisaven käyttäminen ei ole tutkimusten perusteella tarpeen, mikäli kappaleet ovat pinnoiltaan sileiksi hiottuja (kuva 4).



Kuva 3. Kapasitanssin kuvaajat 100 baarin kokeessa.



Kuva 4. Kaoliinisaven käytön vaikutus painelevykokeen tuloksiin.

Betonien kosteuspitoisuudet kasvoivat, kun ne jätettiin vesiupotukseen kyllästämisen jälkeen. Eri kyllästysmenetelmien toimivuutta testattiin, mutta mikään kokeilluista kyllästysmenetelmistä ei poistanut ongelmaa. Uunikuivauslämpötiloina kokeiltiin 105 ja 60 °C, joista 105 °C tuotti korkeammat maksimikosteuspitoisuudet. Viimeisessä tutkimusosiossa kokeiltiin myös koekappaleiden kuivaamista tyhjiöimällä, jotta nähtäisiin onko uunikuivaaminen mahdollista välttää kokonaan. Saavutetun kosteuspitoisuuden perusteella betonin kyllästäminen onnistui yhtä hyvin kuin uunikuivaamalla, mutta tulosten vertailu on hankalaa muissa saman koekappalesarjan testauksissa käytetyn uunikuivauksen ja siitä seuranneen betonin rakenteen muuttumisen vuoksi.

Eri kyllästysmenetelmiä testattiin myös kalsiumsilikaateilla. Menetelmän muuttamisella ei ollut juurikaan vaikutusta saavutettuun maksimikosteuspitoisuuteen. Vesiupotuksessa kyllästämisen jälkeen mahdollisesti tapahtuvan painonnousun havaitseminen oli kalsiumsilikaateilla hankalaa, koska koekappaleista irtosi materiaalia veteen.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vainio, M., 2016. **Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201611244761>.

Vänttinen, K., 2017. **Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet**. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201711282276>.

TULOSSA: Tuominen, O., 2019. **Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet ja mittausten menetelmien kehitys**. Diplomityö. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka.

Tutkimusapulainen Olli Tuominen (olli.tuominen@tuni.fi)



Kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien kuivumisen seurannassa

Tutkimuksen perusteella on suositeltavaa käyttää pistemäisiä lyhytaikaisia porareikämittauksia betonin kuivumisen seurannassa jatkuvien putkimittausten sijaan. Mikäli jatkuvatoimisia mittauksia halutaan käyttää suositellaan mittapäiden asennusta vasta, kun rakenteen lämpötila voidaan pitää mahdollisimman vakiona.

Tausta ja tavoitteet

Paikalla valettujen pinnoitettavien betonirakenteiden kuivumisen arviointi on kriittinen osa rakennusvaihetta. Kuivumisajoilla on merkittävä vaikutus rakennusaikatauluihin, sillä pitkittyvä kuivuminen viivästyttää rakennusvaiheen valmistumista, mutta toisaalta rakenteen riittävä kuivuminen ennen pinnoitusta on varmistettava. Tampereen teknillisellä yliopistolla tutkittiin aiemmin betoniseinien kuivumista (Korhonen 2018) osana COMBI-hanketta. Tutkimuksessa seurattiin valettujen seinärakenteiden kuivumista kapasitiivisilla kosteusantureilla valumuottiin asennetuista mittausputkista jatkuvatoimisina mittauksina. Tutkimuksen aikana mittauksissa havaittiin epä johdonmukaisia ilmiöitä, jotka herättivät epäilyjä mittauksien luotettavuudesta. Korkeissa kosteuspitoisuuksissa tehdyissä jatkuvatoimisissa mittauksissa antureista saatavien lukemien havaittiin sisältävän virhettä jopa yli 10 % RH.

Aiemmassa tutkimuksessa havaittujen ongelmien vuoksi tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytymistä saman kaltaisissa koejärjestelyissä. Tavoitteena on selvittää kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytymistä betoniseinien kuivumisen seurannassa vertailemalla rinnakkain kahden eri tunnetun laitevalmistajan mittapäitä ja näiden eri suodatinvaihtoehtoja. Tutkimuksessa vertaillaan keskenään aiemmassa tutkimuksessa käytettyä Rotronic HC2-S mittapäätä polyeteenisuodattimella (PE) ja teflonsuodattimella (PTFE), Vaisalan HMP110 mittapäätä teflonsuodattimella (PTFE) ja sintratulla terässuodattimella (S) sekä Vaisalan vanhempia HMP230 sekä HMP44 mittapäitä vakiosuodattimilla. Mittapäät kalibroitiin huolellisesti neljän referenssikosteuden perusteella suolaliuosten avulla. Kokeiden aikana tehtiin tarkistusmittauksia vähintään kahden referenssikosteuden perusteella ja tarvittaessa vaihdettiin virhemarginaalin ylittänyt mittapäät kalibroituun yksilöön.

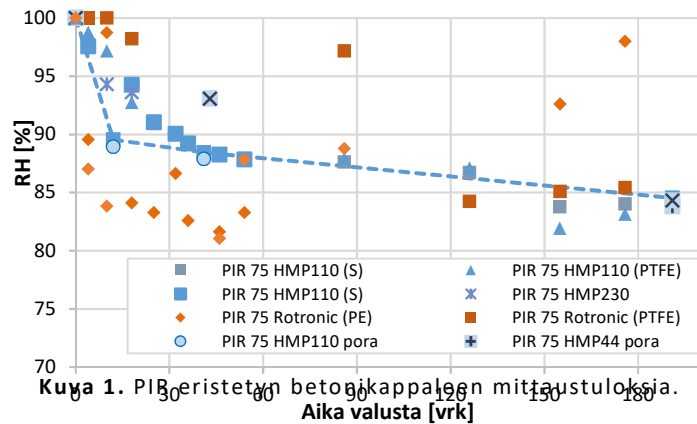
Betonirakenteiden sisäkuorielementtien betonikuoren kerrospaksuus oli 150 mm. Kukin koekappale oli eristetty toiselta puolelta joko 150 mm PIR-, 200 mm EPS- tai 205 mm mineraalivillaeristelevyllä. Jokaista eristetyyppiä kohti oli kaksi koeseinää. Toisen kosteutta mitattiin valuuun asennetuista mittausputkista sekä porareikämittauksilla yhden reiän perusteella. Toisen koeseinän kosteutta mitattiin porareikämittauksilla 2–3 reiän perusteella. Porareikämittaukset tehtiin Vaisala HMP110 mittapäillä ja niitä käytettiin tutkimuksessa referenssinä, koska kyseistä mittausmenetelmää (RT 14-10984) ja mittapäätä käytetään laajasti kentällä. Mittausputkista mitattiin suhteelliset kosteudet aluksi pistemäisesti enintään 60 min tasaantumisajalla. Betonin huokosilman mitatun suhteellisen kosteuden pudottua alle 90 % RH suoritettiin kaksi noin kuukauden kestoista jatkuvien mittausten jaksoa.

Tulokset ja johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella betonin huokosilman suhteellisen kosteuden luotettava mittaaminen jatkuvatoimisesti yli 90 % RH kosteassa betonissa kapasitiivisilla kosteusantureilla on vaikeaa ja mittaukselliset tulokset voivat sisältää merkittäviä virheitä (kuva 1). Betonin kuivuttua alle 90 % RH

mittaustulosten hajonta alkoi tiivistyä lähelle porareikä-mittausten referenssikäyrää. Mittapoikkeamaa aiheuttaa mittalaitteen lisäksi käytetty tasaantumisaika sekä mittausmenetelmä ja mittauksen suoritus. Tulosten perusteella valuun asennettujen mittausputkien käyttäminen lisää mittauksen virhetekijöitä. Yleisesti porareikämittauksen virhetekijöitä on esitelty tarkemmin ohjekortissa RT 14-10984.

Porareikämittauksiin verrattuna Vaisala HMP110 antoi valuun asennettavista putkista samankaltaisimmat mittaustulokset. Eniten poikkeamaa oli mittausten alkuvaiheessa (< 30 vrk). Rotronic HC2-S mittapään peräkkäiset mittauslukemat sisälsivät enemmän hajontaa sekä virheellisiä mittaus-tuloksia. Nyt verrattiin edellisissä tutkimuksessa (Korhonen 2018)



käytössä olleita Rotroniceja uusiin Vaisala HMP110 mittapäihin. Todetut poikkeamat eivät kuitenkaan selity laitteiden käyttöiällä, koska mitattujen kosteuslukemien epäjohton mukainen nousu korkeissa kosteuspitoisuuksissa havaittiin Rotronicin kohdalla myös edellisessä tutkimuksessa, kun mittapääet olivat uusia. Aiempien käyttökokemusten perusteella Rotronic HC2-S soveltuu kuitenkin hyvin muihin käyttötarkoituksiin. Epäjohton mukainen hajonta mittaustuloksissa liittyy todennäköisimmin hyvin kosteaan alkaliseen betoniin ja anturissa tapahtuvaan kondenssiin mikä on yleinen ongelma kapasitiivisilla antureilla mitattaessa korkeita kosteuksia. Ongelma korostuu erityisesti tehtäessä mittauksia muuttuvissa lämpöolosuhteissa esimerkiksi rakennustyömailla.

Jatkuvatoimisten mittausten hyöty suhteessa luotettavuuteen tutkitulla betonilaadulla on kyseenalaista. Alkuvaiheessa mittausvirhe ja riski kondenssille on suuri ja alkuvaiheen jälkeen kuivuminen on niin hidasta, että mittalaitteiden ryömiminen ylöspäin pahimmillaan kumoaa samaan aikaan tapahtuneen kuivumisen. Porareikämittauksissa mitataan esiin poratun betonipinnan kautta haihtuvaa kosteutta tarkasteluhetkellä, eikä tällöin tarvittavalla lyhyemmällä tasaantumisaikalla korkea kosteus niin helposti aiheuta virheellisiä mittaustuloksia, ja anturiin tapahtuvan kondenssin riski on pienempi. Tutkimuksen perusteella on suositeltavaa käyttää pistemäisiä lyhytaikaisia porareikämittauksia betonin kuivumisen seurannassa jatkuvien putkimittausten sijaan. Mikäli jatkuvatoimisia mittauksia halutaan käyttää, suositellaan mittapäiden asennusta vasta, kun rakenteen lämpötila voidaan pitää mahdollisimman vakiona.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Raunima, T. **Kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien ja kipsivalulattioiden kuivumisen seurannassa.** Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. *Kesken.*

Korhonen, L. 2018. **Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut.** Diplomityö.

Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 86 s. + 11 liites. Saatavilla:

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201805091631>

Tutkimusapulainen Tuomas Raunima (tuomas.raunima@tuni.fi)

Tohtorikoulutettava Pauli Sekki (pauli.sekki@tuni.fi)

Betonirakenteiden sisäkuorielementtien kuivuminen - seurantamittaukset

Tutkimuksen perusteella solumuovieristeet rajoittavat kuorielementtirakenteen kuivumista ulospäin merkittävästi. Tästä syystä tulee käyttää kosteusavointa ulkopuolista eristemateriaalia rakenteen kuivumiskyvyn varmistamiseksi, mikäli käytetään vesihöyrytiiviitä ja kosteusherkkiä pintamateriaaleja tai pintarakenteita.

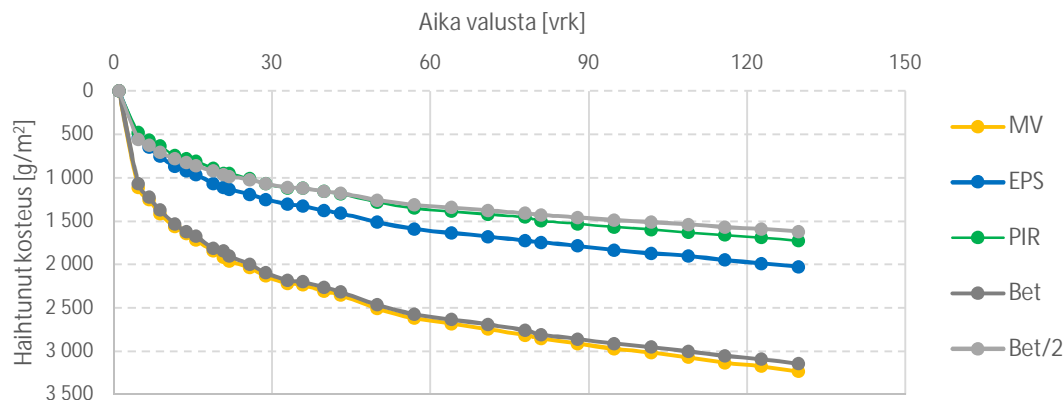
Tausta ja tavoitteet

Betonirakenteiden kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinärakenteet ovat kuitenkin usein varsin paksuja betonirakenteita ja käytössä on useita eri eristysmateriaaleja, jotka voivat olla hyvin vesihöyrytiiviitä estäen tai rajoittaen betonirakenteen kuivumista ulospäin. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinärakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota.

Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti kosteusmittauksin 150 mm paksujen kuorielementti-betonien ($v/s < 0,5$) kuivumista vakio-olosuhteissa. Laboratoriossa tehtyjen rakennekoekappaleiden kuivumiskokeiden perusteella selvitettiin eri lämmöneristeiden vaikutusta betonirakenteen kuivumiseen; Tarkasteltujen eristeiden vesihöyrynvastuskertoimet (μ) ovat mineraalivillalla (MW), $\mu = 1$, EPS-eristeellä $\mu = 30\ldots 40$ ja PIR-eriste tiiviillä muovilaminaatilla $\mu \sim 1100$. Elementtien eristepaksuus valittiin siten, että rakenteen $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ (MV ja EPS 200 mm ja PIR 150 mm). Tulosten perusteella arvioitiin, aiheuttaako kuorielementin rajoitettu kuivuminen riskejä rakenteen toimivuuden kannalta.

Tulokset ja johtopäätökset

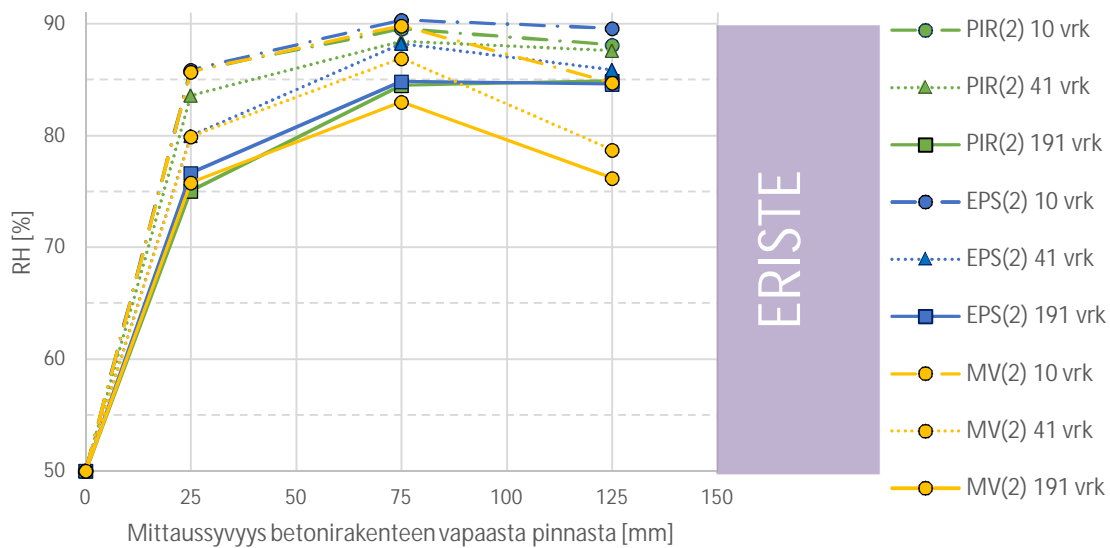
Laboratoriokokeiden ensimmäisessä osiossa koekappaleet punnittiin (kuva 1). Punnitusten perusteella MV-eristetyistä koekappaleista poistui kosteutta yhtä paljon kuin kahteen suuntaan kuivuvasta betonikoekappaleesta (Bet). PIR-koekappaleesta poistui vastaavassa ajassa noin puolet kyseisestä vesimäärästä (vrt. PIR ja Bet/2). EPS-koekappaleesta poistui kosteutta hieman nopeammin kuin PIR-koekappaleesta, mutta selkeästi hitaammin kuin MV-koekappaleesta.



Kuva 1. Koekappaleista poistunut kosteus.

Laboratoriokokeiden toisessa vaiheessa mitattiin koekappaleiden kosteutta eri mittalaitteilla ja menetelmin. Tässä tulokortissa käsitellään eri ajanhetkinä tehtyjen porareikämittausten tuloksia. Mittaukset suoritettiin Betonin suhteellisen kosteuden mittausta RT 14-10984 -ohjekortin mukaisesti. Kultakin syvyydeltä mitattiin 2-3 porareikää, joiden keskiarvona tulos ilmoitettiin. Kosteusjakaumat eri ajanhetkinä on esitetty kuvassa 2. Tulokset osoittavat, että MV eristettyä

rakennetta voidaan tarkastella täysin kahteen suuntaan kuivuvana rakenteena. Sen sijaan solumuovieristettyjä rakenteita tulee tarkastella yhteen suuntaan kuivuvina rakenteina.



Kuva 2. Kosteusjakaumat eri ajanhetkinä

Kuorielementtirakenteen ulkopuolinen eristysmateriaali määrittää betonirakenteen päällystettävyyssyvyyden arviointisyvyyden (A) betonirakenteen paksuudesta (d) riippuen. Vesihöyryavoimella mineraalivillalla A on $0,2 \cdot d$ ja solumuovieristeillä A on $0,4 \cdot d$. Tässä tapauksessa arviointisyvyydet olisivat 30 mm (MV) ja 60 mm (PIR/EPS). Lisäksi pintaosan syvyydellä $0,4 \cdot A$ tulee suhteellisen kosteuden olla yleensä alle 75 % RH.

Tulosten perusteella betonirakenteen kuivuminen esimerkiksi useimmille vedeneristeille vaadittavaan tasoon < 90 % RH tapahtuu varsin nopeasti, kun rakenne on hyvissä kuivumisolosuhteissa (20 °C / 50 % RH). Kyseinen taso saavutettiin jo ensimmäisellä mittauksella 10 vuorokauden kohdalla. Mikäli tavoitellaan päällystettävyyden raja-arvoa 85 %RH (lisäksi $0,4 \cdot A < 75$ % RH), on kuivumisaika solumuovieristeille vaadituilla arviointisyvyyksillä huomattavasti hitaampaa, koska tulosten perusteella kuivuminen hidastui alkuvaiheen jälkeen merkittävästi.

Tutkimuksen perusteella solumuovieristeet rajoittavat kuorielementtirakenteen kuivumista ulospäin merkittävästi. Mikäli käytetään vesihöyrytiiviitä ja kosteusherkkiä pintamateriaaleja tai pintarakenteita, on suositeltavaa käyttää kosteusavointa ulkopuolista eristemateriaalia rakenteen kuivumiskyvyn varmistamiseksi; käytettäessä vesihöyrytiivistä eristettä, on sisäpuolisen pintamateriaalin oltava riittävän vesihöyryavoin rakenteen kuivumiskyvyn varmistamiseksi.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Korhonen, L. 2018. Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 86 s. + 11 liites. [URN.fi/URN:NBN:fi:ttu-201805091631](https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/201805091631)

Raunima, T. Kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien ja kipsivalulattioiden kuivumisen seurannassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. Julkaistaan 2019.

Tohtorikoulutettava Pauli Sekki (pauli.sekki@tuni.fi)



Betonirakenteiden sisäkuorielementtien kuivuminen – laskennallinen tarkastelu

Kuorielementtirakenteen ulkopuolisella eristysmateriaalilla on merkitystä betonin sisäpinnan loppukosteuteen pintamateriaalin asennuksen jälkeen, mutta suurempi merkitys on pintamateriaalin vesihöyrynvastuksella.

Rakenteen kastumisajan lyhentäminen on tehokkain tapa saavuttaa rakenteelle määritetty tavoitekosteus.

Tausta ja tavoitteet

Betonirakenteiden kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinärakenteet ovat kuitenkin usein varsin paksuja betonirakenteita ja käytössä on useita eri eristysmateriaaleja, jotka voivat olla hyvin vesihöyrytiivisiä estäen tai rajoittaen betonirakenteen kuivumista ulospäin. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinärakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota.

Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti kosteusmittauksin 150 mm paksujen kuorielementti-betonien ($v/s < 0,5$) kuivumista vakio-olosuhteissa. Laboratoriossa tehtyjen rakennekoekappaleiden kuivumiskokeiden perusteella selvitettiin eri lämmöneristeiden vaikutusta betonirakenteen kuivumiseen; Tarkasteltujen eristeiden vesihöyrynvastuskertoimet (μ) ovat mineraalivillalla (MW), $\mu = 1$, EPS-eristeellä $\mu = 30\ldots 40$ ja PIR-eriste tiiviillä muovilaminaatilla $\mu \sim 1100$. Elementtien eristepaksuus valittiin siten, että rakenteen $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ (MW ja EPS 200 mm ja PIR 150 mm). Tulosten perusteella arvioitiin, aiheuttaako kuorielementin rajoitettu kuivuminen riskejä rakenteen toimivuuden kannalta.

Tulokset ja johtopäätökset

Laboratoriossa tehtyjen rakennekoekappaleiden kuivumiskokeiden perusteella kosteudet olivat kaikkien koekappaleiden sisäpintaa lähinnä olevan mittauspisteen (25 mm) osalta kaikkina ajanhetkinä yhden %-yksikön sisällä. Keskipisteen 75 mm

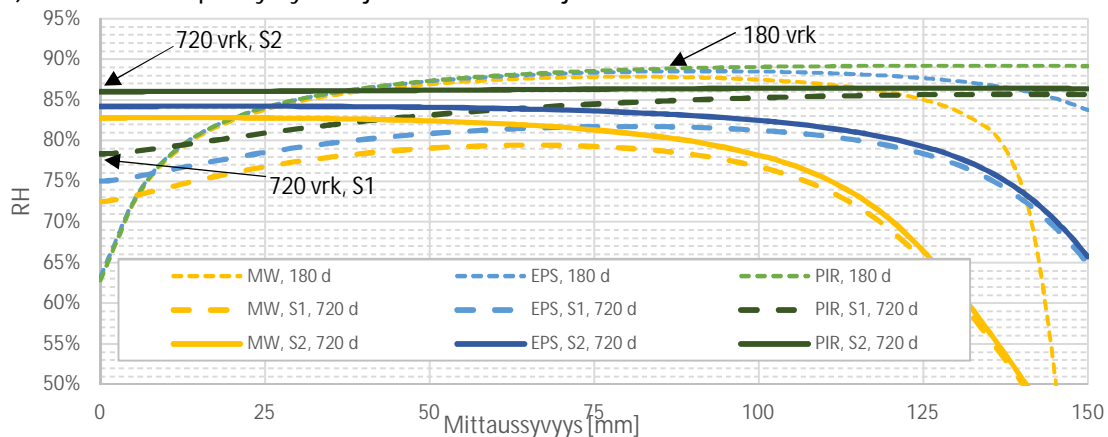
Mitt. vrk	Mitt. mm	MW 25	75	125	EPS 25	75	125	PIR 25	75	125
12	mitattu	0.86	0.90	0.85	0.86	0.90	0.90	0.86	0.90	88
	laskettu	0.85	0.87	0.86	0.85	0.88	0.89	0.85	0.88	89
40	mitattu	0.80	0.87	0.79	0.80	0.88	0.86	0.80	0.88	88
	laskettu	0.81	0.85	0.83	0.82	0.87	0.87	0.82	0.87	88
191	mitattu	0.76	0.83	0.76	0.77	0.85	0.85	0.76	0.85	85
	laskettu	0.74	0.82	0.76	0.76	0.84	0.84	0.76	0.85	87
	virhe maks.	1.4	1.4	1.2	0.0	3.8	1.7	0.0	1.3	1.9
	virhe min.	-2.0	-2.0	-1.6	-2.5	-0.5	-1.0	-2.1	-0.7	-0.7

Taulukko 1. Kuivumiskokeiden kosteusmittaustulokset sekä laskentatulokset [% RH]. Laskentavirhe [%-yksikköä]

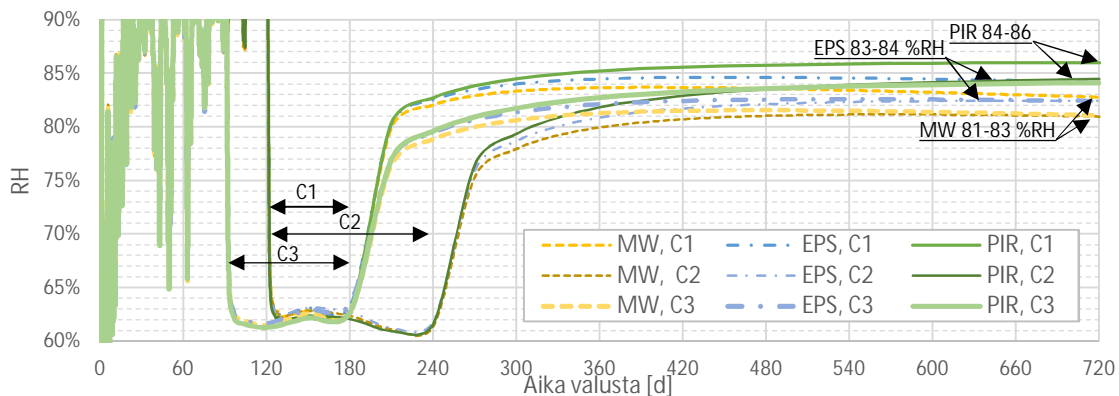
osalta MW kuivui lopputilanteessa 2 prosenttiyksikköä solumuovieristettyjä kuivemmaksi. Eristeenpuoleisen mittauspisteen 125 mm kosteudet olivat lopputilanteessa EPS- ja PIR-koekappaleilla odotetusti selkeästi korkeammat kuin MW:lla (EPS/PIR 85 % RH ja MW 76 % RH). Laskentamallin vastaavuus kosteusmittauksiin verrattuna saatiin kohtalaisen hyväksi. Erot laskennan ja mittausten välillä on esitetty taulukossa 1.

Laskentamallin kalibroinnin jälkeen tarkasteltiin kuorielementtirakenteiden kuivumista käytännön aikataulua ja kosteusolosuhteita vastaavassa tilanteessa (tapaukset C1-C3) sekä tarkasteltiin eri pintarakenteiden (S1 ja S2) vaikutusta betonirakenteeseen muodostuvaan kosteusjakaumaan (kuvat 1 ja 2). Tapausten kastumisjaksojen pituudet olivat neljä kuukautta (C1 ja C2) ja kolme kuukautta (C3) sekä kuivatusjaksot kaksi (C1), neljä (C2) ja kolme (C3) kuukautta. Kastumisjakson aikana rakenne on alttiina ulkoilman kosteudelle muttei sateelle (sateen vaikutuksen mallintamiseen ei ollut käytettävissä verrokkiaineistoa). Kuivatusjakson

aikana vallitsi vakio-olosuhteet 20 °C ja 60 % RH. Kuivatusjakson jälkeen rakenteen sisäpintaan asennetaan tavanomainen vedeneriste S1 ($S_d = 6$ m) tai hyvin tiivis pintamateriaali S2 ($S_d = 100$ m). Olosuhteena päällistykseen jälkeen on 20 °C ja 50 % RH.



Kuva 1. Kosteusjakaumat ennen pintamateriaalin asennusta ja sen jälkeen (C1).



Kuva 2. Kastumisajan ja kuivatusjakson pituuden vaikutus kosteuteen pintamateriaalin S2 alla.

Tutkimuksen perusteella kuorielementtirakenteen ulkopuolisella eristysmateriaalilla on merkitystä betonin sisäpinnan loppukosteuteen pintamateriaalin asennuksen jälkeen, mutta suurempi merkitys on pintamateriaalin vesihöyrynvastuksella. Seinärakenteissa yleisesti käytettävien materiaalien vesihöyrynvastus on niin alhainen (maalit ja vedeneristeet $S_d = 0,1 \dots 6$ m), että riski vaurioitumisen kannalta on vähäinen. Sisäpuolisten täysin tiiviiden rakennekerrosten tai pintamateriaalin kanssa tulee kuitenkin varmistua rakenteen kuivumiskyvystä, jolloin on suositeltavaa käyttää vesihöyryä hyvin läpäisevää lämmöneristettä. Yleisesti betonirakenteiden kuivumiseen liittyen voidaan todetta, että rakenteen kastumisajan lyhentäminen on tehokkain tapa saavuttaa rakenteelle määritetty tavoitekosteus.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Sekki, P. Korhonen, L. & Vinha, J. 2017. Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomi-oivalla FEM-laskennalla. Rakennusfysiikka 2017: Uusimmat tutkimustulokset ja käytännön ratkaisut. Tampere. 7 s.

Korhonen, L. 2018. Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 86 s. + 11 liites. [URN.fi/URN:NBN:fi:ttt-201805091631](https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka)

Raunima, T. Kapasitiivisten kosteusantureiden käyttäytyminen betoniseinien ja kipsivalulattioiden kuivumisen seurannassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. Kesken.

Sekki, P. & Vinha, J. 2019. Moisture behavior of highly insulated precast element walls. Julkaisun kirjoitustyö käynnissä.

Tohtorikoulutettava Pauli Sekki (pauli.sekki@tuni.fi)

Sisäinen konvektio puhallusvillaeristeisissä yläpohjissa

Sisäinen konvektio heikentää puhalluseristeellä eristetyn yläpohjarakenteen lämmöneristävyyttä ja tietyissä tilanteissa myös kosteusteknistä toimintaa.

Puukuitu- ja lasipuhallusvillassa tapahtuu sisäistä konvektiota lämpötilaeron ollessa suuri. Lasipuhallusvillassa konvektio heikentää lämmöneristävyyttä merkittävästi.

Lasipuhallusvillalla eristetyissä yläpohjarakenteissa ilmavirtauksen lisääminen tuuletusvälissä kasvattaa sisäistä konvektiota ja heikentää lämmöneristävyyttä.

Tutkimuksen tausta

Sisäinen konvektio lämmöneristekerroksessa tarkoittaa tilannetta, jossa lämpötilaeroista johtuen lämmöneristekerroksessa oleva lämmin ilma pyrkii nousemaan ylöspäin, kun taas kylmä ilma painuu alaspäin. Sisäinen konvektio kasvattaa lämpöhäviöitä eristekerroksen läpi, muuttaa rakenteen lämpötilakenttää ja voi heikentää sen kosteusteknistä toimintaa. Lämmöneristepaksuuden lisääminen kasvattaa sisäisen konvektion muodostumisen mahdollisuutta, kuten myös rakenteen yli vallitsevan lämpötilaeron kasvaminen ja lämmöneristeen suuri ilmanläpäisevyys. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, paljonko puhallusvillaeristeen sisällä tapahtuu sisäistä konvektiota ja miten eri tekijät vaikuttavat sisäisen konvektion määrään.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Puhallusvillaeristeiden sisäistä konvektiota on tutkittu jo aiemmin TTY:llä FRAME-projektin yhteydessä, jolloin syntyi tarve jatkotutkimuksille. COMBI:n kokeissa haluttiin saada selville suuremman tutkimusaukon koon, eristeiden asennusmenetelmän ja kattoristikoiden vaikutus koetuloksiin. FRAME:n kokeista poiketen COMBI:n kokeissa puhallusvillat asennettiin tutkimusaukkoon puhallusvillan puhalluskoneella, jotta asennus vastaisi paremmin normaalia asennustilannetta. FRAME:ssa asennus tehtiin käsin ripottelemalla. Lisäksi COMBI:n kokeissa käytettiin suurempaa koekammiota, mikä mahdollisti myös suuremman tutkimusaukon koon. Pelkän eristekerroksen lisäksi tutkimukseen otettiin mukaan yläpohjia, joissa oli kattoristikot.

Tutkimukset tehtiin yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla, jolla voidaan tutkia pinta-alaltaan noin 5 m² yläpohjan osaa. Tutkimuksissa rakenteena käytettiin yläpohjia, joissa vesivanerin päällä oli höyrynsulku ja eristeenä 300 mm ja 600 mm paksuinen kerros puhallusvillaa. Kokeet suoritettiin FRAME:n kokeiden tapaan puukuitu- sekä lasipuhallusvillalla 20 °C ja 35 °C lämpötilaeroilla. Kokeet suoritettiin kattoristikoiden kanssa sekä vertailuksi pelkällä eristekerroksella. Kattoristikot oli asennettu k900-jaolla. Paksumman eristeen tapauksessa tutkittiin myös tuuletuksen vaikutusta sisäiseen konvektioon, jolloin lähes tuulettumattomassa tilanteessa tuulettustilan ilmavirtaus oli noin 0 m/s ja runsaasti tuulettuvassa 0,6 m/s.



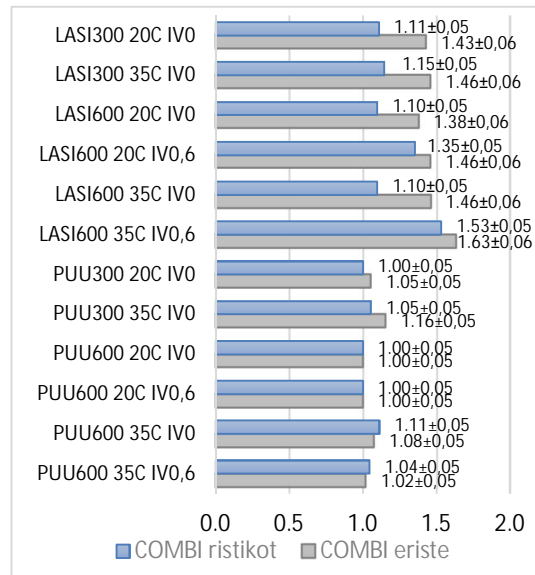
Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto. Laitteistolla on tutkittu kattorakenteiden sisäistä konvektiota Calibrated Hot Box -menetelmällä.

Tulokset ja johtopäätökset

Suoritetun laboratoriotutkimusten perusteella suurin vaikutus lämmöneristekerroksen sisäiseen konvektion oli puhalluslämmöneristeen tyyppillä. Erityisesti lasipuhallusvillalla eristetyissä yläpohjissa tapahtuu sisäistä konvektiota jo 20 °C lämpötilaerolla. Puukuitupuhallusvilla on yläpohjarakenteissa pääsääntöisesti tiheämpää kuin lasipuhallusvilla. Lisäksi sen ominaisuutena on painuminen jopa 20 % puhalluskorkeudesta, jolloin tiheys kasvaa entisestään. Puukuitupuhallusvillaan ei pääse syntymään yhtä suurta sisäistä konvektiota kuin lasipuhallusvillaan mm. sen tiheyden ja puhallusvillan rakenteen ansiosta. Kuitenkin myös puukuitupuhallusvillassa havaittiin sisäistä konvektiota etenkin suurilla lämpötilaeroilla.

Lasipuhallusvillalla runsaasti tuuletetussa tilanteessa ilmavirtaus pääsee voimistamaan sisäistä konvektiota merkittävästi paksulla eristekerroksella, mikä tulisi ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Puukuitueristeellä ei ole havaittavissa samanlaista ilmiötä. Lasipuhallusvillalla eristetyissä yläpohjissa lämpövirta rakenteen läpi lisääntyi suurimmillaan jopa 63 %. Lasipuhallusvillalla mielenkiintoisena yksityiskohtana voidaan myös huomata, että kattoristikoiden lisääminen rakenteeseen pienensi useimmissa tapauksissa ilmavirtauksen vaikutuksia.

Puukuitueristeellä 20 °C lämpötilaerolla konvektiolla ei ollut juurikaan vaikutusta rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan, kun taas 35 °C lämpötilaerolla konvektio lisäsi lämpövirtaa korkeimmillaan 16±5 %. FRAME:n kokeissa suurempi lämpövirran lisäys selittyi suurelta osin eristeen käsinasennuksella, jolloin eristeen rakenne eroaa huomattavasti koneella puhalletusta puukuitueristeen rakenteesta.



Nusseltin luvut. Kuvaajassa on esitetty eri koevaiheissa saadut Nusseltin luvut, jotka kuvaavat sisäisen konvektion tapahtumista. Nusseltin luvun ollessa yli 1 rakenteessa tapahtuu sisäistä konvektiota. Keskimääräinen epätarkkuus oli ±5,0 % puukuitueristeen mittauksissa ja ±4,1 % lasikuitueristeen mittauksissa. Koetilanteen nimessä on ilmoitettu eristeen tyyppi, mittauksessa käytetty lämpötilaero sekä tuuletusilmavirran nopeus.

Puukuitueristeellä suurin yksittäinen sisäistä konvektiota kasvattava tekijä oli lämpötilaeron kasvattaminen. Lasipuhallusvillalla taas suurimmat yksittäisen muuttujan vaikutukset saatiin ilmavirtauksen kasvattamisella ja poistamalla kattoristikot. Lämmöneristekerroksen paksuudella ei vaikuttanut olevan mittaustarkkuuden rajoissa yhtä merkittävää vaikutusta. Varsinkin lasipuhallusvillassa tapahtuva sisäinen konvektio tulisi ottaa huomioon yläpohjan lämpöhäviöiden ja energiankulutuksen laskennassa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Kivioja, H., Vinha, J., Tuominen, E. & Viitala, M. 2019. Hot box measurements to investigate internal convection of highly insulated loose-fill mineral wool roof structures. Manuscript writing on process.

Projektitutkija Henna Kivioja

Professori Juha Vinha (juha.vinha@tuni.fi)

Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli

Ilmanvaihdosta aiheutuvia paine-eroja tulee mitata ja säätää sopiviksi rakennuksen eri käyttötilanteille.

Paine-erot voivat vaihdella suuresti eri käyttötilanteissa.

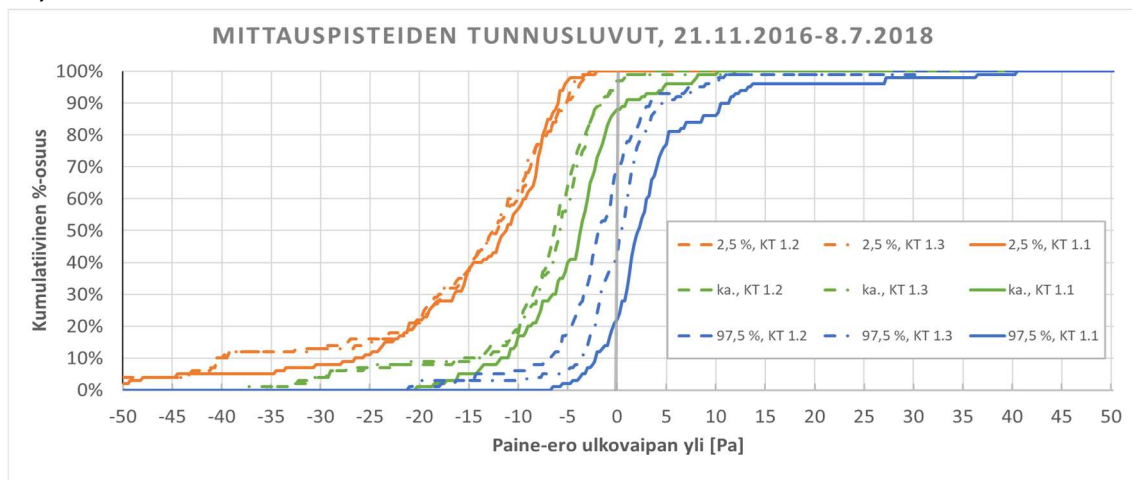
Tausta ja tavoitteet

Paine-eroa ulkovaipan yli mitataan seurattessa rakennuksen sisäilmaolosuhteita; alipaine rakennuksen sisällä aiheuttaa ulkoilman siirtymistä rakennuksen sisäilmaan ulkovaipan läpi ja ylipaine puolestaan sisäpuolisen ilman siirtymistä ulkoilmaan. Iso ylipaine voi kasvattaa rakenteiden kosteuskuormitusta, jos sisäilmassa on kosteuslisää ulkoilmaan nähden. Vastaavasti alipaine voi vetää sisäilmaan epäpuhtauksia rakenteista. Paine-erot ovat jatkuvassa muutoksessa ilmanvaihdon, lämpötilaerojen, tuulen ja tilojen käytön seurauksena.

COMBI-hankkeen kenttämittauksissa tutkittiin yleisellä tasolla 24 kohdetta, joista 12 oli uudiskohteita ja toiset 12 korjauskohteita. Tampereen ja Pirkanmaan alueella sijaitsee 14 kohdetta ja Helsingissä 10. Rakennuksia oli yhteensä 22, joista kahdessa uudis- ja vanhaosa luokiteltiin erillisiksi uudis- ja korjauskohteeksi. Uudiskohteiden rakennusvuodet vaihtelivat 2006–2015 välillä ja korjauskohteissa rakennusvuodet olivat 1800-luvun lopulta 1980-luvulle. Paine-eroja tarkasteltiin 21.11.2016–8.7.2018 väliseltä kaudelta. Käyttö- ja lomakausien eroja vertailtiin talvikaudella 2016–2017 ja kevät/kesäkaudella 2018. Käyttökaudet olivat 12–18.12.2016 ja 14–20.5.2018 ja lomakaudet 26.12.2016–1.1.2017, 4–10.6.2018 ja 2–8.7.2018. Mittauksia tehtiin tilojen ala- sekä yläosista.

Tulokset ja johtopäätökset

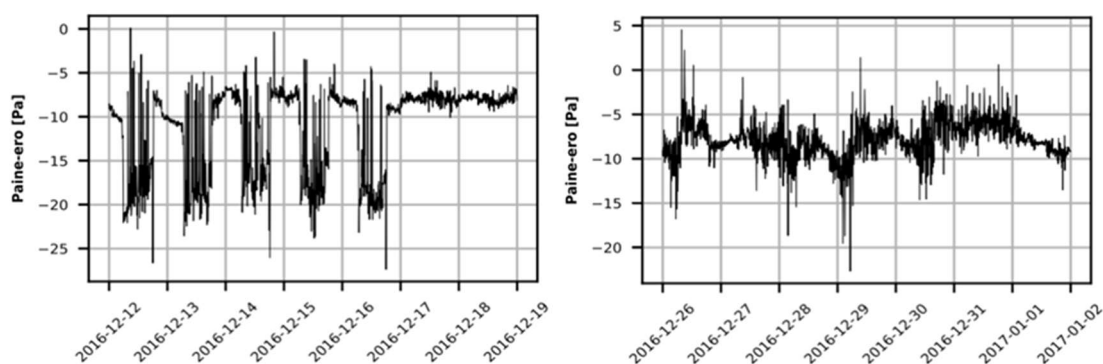
Tarkastellun kauden 21.11.2016–8.7.2018 mittauspisteistä laskettiin tunnusluvut eri käyttötilanteissa (kuva 1): keskiarvo, 2,5% persentiili ja 97,5% persentiili. Persentiilien avulla nähdään paine-erojen vaihteluväli, jolla mittaus tulokset ovat 95% ajasta. Vaihteluvälin ulkopuoliset mittaus tulokset katsottiin hetkellisiksi. Vähintään -15 Pa:n alipaineita esiintyi hetkellisesti 40 % mittauspisteistä ja hetkellisiä 0 Pa:n ylipaineita 30–80% mittauspisteistä eri käyttötilanteissa.



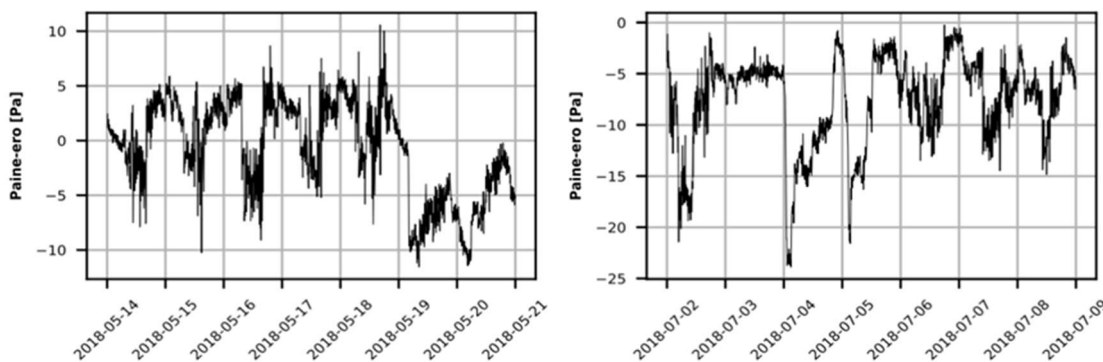
Kuva 1. Mittauspisteistä laskettujen ala- ja yläpersentiilien (2,5% ja 97,5%) ja keskiarvon kumulatiiviset kertymät 21.11.2016–8.7.2018, Ma-Pe 10:00–14:00 (KT 1.1), Ma-Pe 23:00–4:00 (KT 1.2) ja La-Su (KT 1.3).

Arkipäivän käyttötilanteen (KT 1.1) aikaan paine-eron keskiarvo oli -5...0 Pa välillä 50 prosentissa mittauspisteistä. Käyttötuntien ulkopuolella (KT 1.2 ja KT 1.3) tämä paine-ero toteutui 35 prosentissa mittauspisteistä. 2,5% persentiilit vaihtelivat -104,9... -2 Pa:n ja 97,5% persentiilit -21... 40,3 Pa:n välillä. Noin 95 prosenttia 2,5% persentileistä olivat -45... -2 Pa:n välillä. Keskiarvot vaihtelivat -37,6... 11,8 Pa:n välillä. Arkipäivän käyttötilanteen (KT 1.1) keskiarvot ja 97,5% persentiilit ovat yleisesti ylipaineisempia verrattuna muihin käyttötilanteisiin (KT 1.2 ja 1.3).

Käyttö- ja lomakausia vertailtaessa havaittiin kohteiden paine-erojen pienenevän, pysyvän samoina tai kasvavan. Paine-erojen kaventumista tapahtui erityisesti tapauksissa, joissa käyttökauden paine-erot olivat suuresti yli- tai alipaineisia (kuva 2). Paine-erojen kasvu johtui tuuliolosuhteiden muutoksista ja osin myös ilmanvaihdosta (kuva 3).



Kuva 2. Tässä kohteessa havaittiin käyttökaudella 12-18.12.2016 käyttötilanteessa noin -20 Pa:n alipaineisuutta. Lomakaudella 26.12.2016-1.1.2017 paine-erot vaihtelevat -10... -5 Pa:n välillä.



Kuva 3. Tässä kohteessa havaittiin käyttökaudella 14-20.5.2018 paine-erot ovat arkipäivisin ylipaineisia. Lomakaudella 2-8.7.2018 paine-erot ovat alipaineisia ja ajoittain esiintyy yli -15 Pa:n alipaineita.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Kauppinen, A., 2018. **Uusien ja korjattujen palvelurakennusten paine-erot ulkovaipan yli**. Diplomityö.

Tampere. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttv-201811292781>

Tutkimusapulainen, RI Antti Kauppinen (antti.kauppinen@tuni.fi)

Projektitutkija, DI Eero Tuominen (eero.tuominen@tuni.fi)

Sisäilman kosteuslisä ja lämpötilan sisäilmastoluokka kouluissa ja päiväkodeissa

Sisäilman kosteuslisä oli keskimäärin pieni, mutta yksittäisten kohteiden kosteuslisän arvot ja sen käyttäytyminen vaihtelivat. Sisäilman kosteuslisän määrä on suositeltavaa edelleen määrittää tarvittaessa erikseen mittauksin.

Sisäilman lämpötilojen käyttäytymistä suositusarvojen sisällä tulee seurata rakennuksen ja sen järjestelmien toimivuuden arvioimiseksi ja parantamiseksi.

Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteita on suositeltavaa tarkastella numeeristen arvojen lisäksi kuvaajina, jolloin huolto- ja ylläpitohenkilöstön on helpompi havaita mahdollisia kehityskohteita.

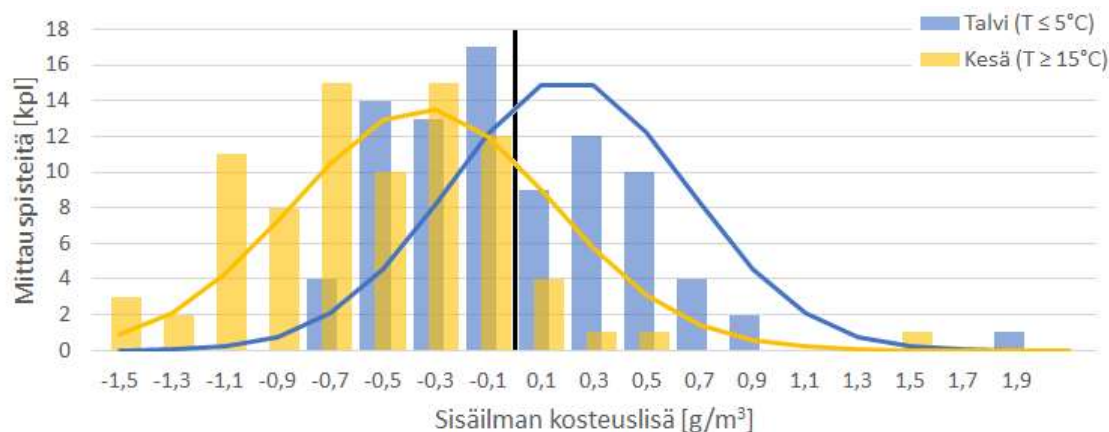
Tausta ja tavoitteet

Tutkimuksessa tehtiin mittauksia yhteensä 24 päiväkot- ja koulurakennuksessa, joista puolet oli uudiskohteita ja puolet korjauskohteita. Kohderakennuksissa mitattiin noin kahden vuoden ajan sisäilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Mittauspisteitä oli kaikkiaan 86 ja rakennuksen laajuudesta riippuen kussakin kohteessa tehtiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittauksia 1–8 mittauspisteestä. Ulkoilman olosuhteina käytetään Ilmatieteen laitoksen lähimmän sääaseman mittausarvoja. Datan analysointi perustuu tunnittaisiin mittausarvoihin.

Kenttämittauksissa kerätyn mittausdatan perusteella määritettiin ja taulukoitiin kohderakennusten sisäilman kosteuslisä ja lämpötilan sisäilmastoluokka. Sisä- ja ulkoilman välistä vesihöyrypitoisuuseroa kuvaavan kosteuslisän osalta rakennukset jaoteltiin ohjeessa RIL 107-2012 esiteltäviin kosteusluokkiin 1–3, joista kosteusluokka 3 on kuivin. Sisäilman lämpötilan osalta käytettiin sisäilmastoluokkia S1, S2 ja S3, joista käyttäjäytyvyys yltää todennäköisemmin suurimpaan osuuteen sisäilmastoluokassa S1.

Tulokset ja johtopäätökset

Mittausten perusteella rakennusten sisäilman kosteuslisä oli ohjearvoihin (RIL 107-2012) verrattuna matala ja kaikki kohteet kuuluivat kosteusluokkaan 3, sillä kosteuslisä oli keskimäärin lähellä nollaa. Talvi- ja kesäjaksojen keskimääräiset kosteuslisät mittauspisteittäin on esitetty kuvassa 1.

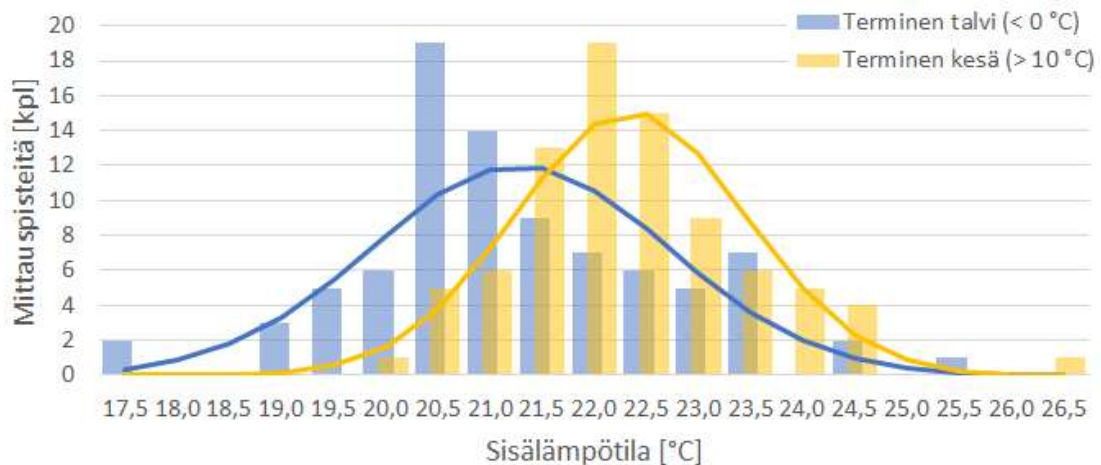


Kuva 1. Talvi- ja kesäjaksojen keskimääräiset kosteuslisät mittauspisteittäin.

Kohteiden kosteuslisät olivat keskimäärin lähellä nollaa, mutta kosteuslisän kuvaajan pistepilven muoto vaihteli. Ulkoilman lämpötilaan verrattaessa kosteuslisän arvojen pistepilvi painottui lähelle nollaa suurimmassa osassa mittauspisteistä, mutta monessa mittauspisteessä pistepilvi oli talvella positiivisella puolella ja laski lämpötilan noustessa kosteusvajeen puolelle. Korjauskohteissa sisäilma oli talvella kuivempaa (kosteuslisä pienempi) uudiskohteisiin verrattuna. Tälle selittäviä tekijöitä voivat olla erot ilmanvaihtojärjestelmien toiminnassa, rakennusten käytössä ja mittauslaitteiden sijoittelussa.

Lämpötilan sisäilmastoluokituksen osalta kaksi uudiskohdetta ylsi sisäilmastoluokkaan S2. Muissa kohteissa sisäilman käytönaikaisen lämpötilan ohjeelliset raja-arvot ylittyivät, minkä vuoksi nämä kohteet kuuluvat sisäilmastoluokkaan S3. Kohteissa esiintyi käytönaikaisen lämpötilan raja-arvojen ylittymistä ja alittumista, mutta vähimmäisarvon alittuminen oli enimmäisarvon ylittymistä yleisempää.

Sisäilman lämpötilojen keskiarvot on esitetty kuvassa 2. Kesän ja talven ulkolämpötiloina on käytetty niiden 24 tunnin liukuvia keskiarvoja.



Kuva 2. Talvi- ja kesäjaksojen keskimääräinen sisälämpötila mittauspisteittäin.

Yksittäisissä kohteissa esiintyy monenlaisia ilmiöitä, jotka pelkällä numeerisella tarkastelulla jäävät helposti huomaamatta. Kenttämittauskohteiden joukossa oli sekä jäähdytettyjä että jäähdyttämättömiä rakennuksia. Dataa tarkasteltaessa kuvaajana osassa mittauspisteistä pistepilvi pysyi hyvin suositusarvojen sisällä, mutta osassa paljastui selkeitä kehityskohtia. Kuvaajasta voi tehdä tulkintoja lämmityksen ja jäähdytyksen säädöstä. Selkeitä puutteita säädössä oli esimerkiksi tapauksissa, joissa talvella sisäilma oli lämpimämpää kuin kesällä. Lisäksi osassa mittauspisteistä esiintyi äärilämpötiloja. Tämän vuoksi on suositeltavaa tarkastella mittausdataa numeerisen tarkastelun lisäksi kuvaajina, jolloin huolto- ja ylläpitohenkilöstön on helpompi havaita mahdollisia kehityskohteita.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vinha et al. (n.d.) **Uusien ja korjattujen palvelurakennusten kenttämittaukset COMBI-tutkimushankkeessa**. Tampereen yliopisto, rakennustekniikan yksikkö, rakennusfysiikka. [julkaistaan 2019]

Tutkimusapulainen Tuomas Raunima (tuomas.raunima@tuni.fi)



Sisäilman hiilidioksidipitoisuudet kouluissa ja päiväkodeissa

Hiilidioksidipitoisuus palvelurakennuksissa riippui vahvasti niiden käytöstä. Erot olivat suurempia eri kohteiden välillä, verrattuna yksittäisen rakennuksen käytössä tapahtuvaan vaihteluun.

Jatkuvatoimiset hiilidioksidipitoisuuden mittaukset tulee muistaa tehdä riittävän tiheällä mittausvälillä.

Tausta ja tavoitteet

Tavanomaisten koulujen ja päiväkotien sisäilma sisältää useita erilaisia yhdisteitä, joista yksi on hiilidioksidi (CO₂). Sisäilmaan päätyy hiilidioksidia esimerkiksi ulkoa ilmanvaihdon tuloilman sekä sisältä ihmisten uloshengityksen mukana. Korkeat hiilidioksidipitoisuudet aiheuttavat väsymyksen tunnetta ja korkeilla pitoisuuksilla myös esimerkiksi päänsärkyä, mistä syystä johtuen sisäilman hiilidioksidipitoisuudelle on asetettu sekä pakollisia että vapaaehtoisia tavoitearvoja.

COMBI-tutkimushankkeen osana seurattiin sisäilman hiilidioksidipitoisuutta jatkuvatoimisesti 24 kohteessa ja yhteensä 55 mittauspisteessä (1–3 mittauspistettä per kohde) vuosina 2016–2018. Mittausdatan lopullinen määrä vaihteli kohteittain 3–23 kk välillä, keskiarvon ollessa 16 kk. Eniten otoksessa oli mukana päiväkotien ryhmätiloja (20 kpl) ja koulujen opetusluokkia (12 kpl). Tutkimusosion tavoitteena oli tuottaa tietoa sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tasoista suomalaisissa palvelurakennuksissa, pohjautuen pitkäkestoisin ja jatkuvatoimisiin mittauksiin kohtuullisen isossa otoksessa sisältäen sekä uusia että peruskorjattuja suomalaisia palvelurakennuksia.

Tulokset ja johtopäätökset

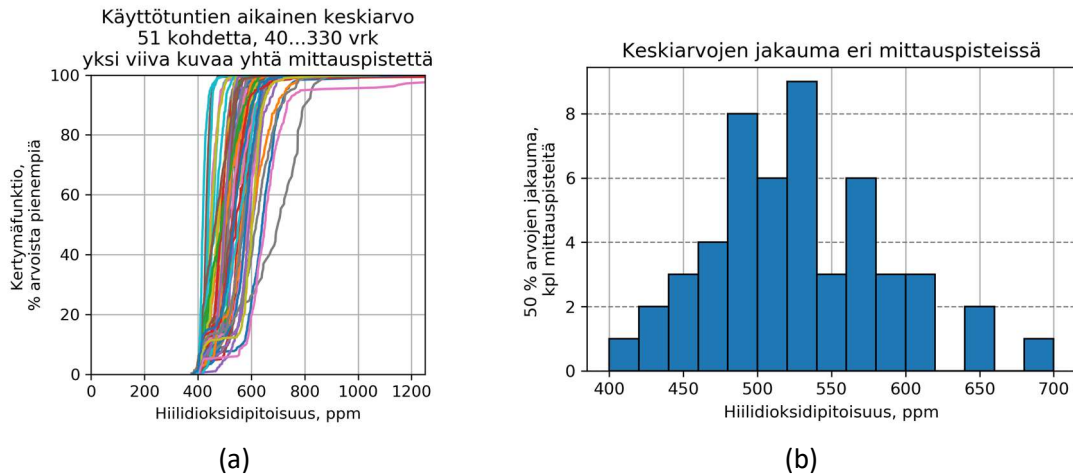
Tutkimuskohteissa oli mukana yksi uusi ja yksi peruskorjattu vanhainkoti ja näissä rakennuksissa sijaitsevien asuintilojen (neljä mittauspistettä) hiilidioksidipitoisuuden käyttäytyminen poikkesi selvästi otoksen pääosan muodostaneista kouluista ja päiväkodeista. Vanhainkotien asuintilat jätettiin tästä syystä pois jatkotarkasteluista.

Säännöllisesti käytössä olevissa kouluissa ja päiväkodeissa sisäilman hiilidioksidipitoisuus vaihteli talvikaudella selvästi rakennuksen käyttötuntien mukaan. Selvästi suurimmassa osassa tapauksia oli erotettavissa ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden mukaan määräytyvä yö- ja loma-aikainen perustaso sekä rakennuksen käytöstä aiheutuva lisä. Muutamissa tapauksissa oli aineistossa nähtävissä tilanne, jossa rakennuksen iltakäytöstä aiheutuva hiilidioksidilisä ei ehtinyt poistumaan rakennuksesta ennen ilmanvaihdon sammuttamista yöksi, jolloin huonetilojen pitoisuus laski yöaikana hyvin hitaasti. Pitoisuus kuitenkin laski ilmanvaihdon käynnistyessä seuraavana aamuna nopeasti lähelle ulkoilman tasoa. Kesäkaudella sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli tyypillisesti matala, johtuen tilojen talvikautta vähäisemmästä käytöstä.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tallennusväliksi asetettiin kenttämittauksia käynnistäessä yksi tunti, joka osoittautui myöhemmin liian harvaksi arvoksi. Esimerkiksi koulujen luokissa oppilaiden ja opettajien paikallaolo tapahtuu vahvasti oppituntien aikataulun mukaan ja muutokset sisäilman hiilidioksidipitoisuudessa voivat yhden tunnin aikana vaihdella huomattavasti. Jos tarkempaa tietoa ei ole käytettävissä, tulee erilaiset mittaukset muistaa

aloittaa käyttäen riittävän tiheää mittaussväliä (enintään muutamia minuutteja) ja vasta myöhemmin pidentää sitä mahdollisuuksien mukaan.

Vertailuaineistona käytettäväksi kuvassa 1 on esitetty sisäilman hiilidioksidipitoisuuden käyttötuntien vuorokausikeskiarvojen kertymäfunktioit sekä niiden 50 % arvoja vastaava jakauma. Arvot on laskettu viikkojen 33–17 arkipäivien (ma-pe) käyttötunneilta (klo 9-15).



Kuva 1. a) Hiilidioksidipitoisuuden käyttötuntien vuorokausikeskiarvot eri mittauspisteissä ja b) kertymäfunktioiden 50 % arvojen jakauma. Huom. Tiedot on tarkoitettu vertailuaineistoksi, ei kuvaamaan erilaisten raja-arvojen täyttymistä.

Käyttötuntien vuorokausikeskiarvojen 50 % persentiilit olivat pääosin 450–650 ppm välillä. Vastaavasti käyttötuntien vuorokausimaksimien 50 % persentiilit olivat pääosin 500–800 ppm välillä. Puolivälin persentiilit kuvaavat arvoja, joissa puolet vuorokausista ovat esitettyjä lukuja matalammalla tasolla ja puolet korkeammalla. Luvut perustuvat yhden tunnin välein tehtyihin mittauksiin ja on tarkoitettu ensisijaisesti tulosten vertailemista varten.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden osalta talvikauden viikot olivat keskenään verrattain samankaltaisia. Erot eri mittauspisteiden välillä olivat suurempia, kuin erot peräkkäisten päivien tai viikkojen välillä.

Usean mittauspisteen mittaustuloksissa esiintyi huhtikuun lopun ja elokuun puolivälin välisenä kesäkautena hiilidioksidipitoisuuden nousua yöaikaan, kun mittaustuloksia tarkasteltiin viikkokohtaisten kuvaajien avulla. Ilmiötä ei saatu poissuljettua mittalaitteista tai niiden käytöstä johtuvaksi, vaikkakaan hiilidioksidipitoisuuden yöaikaisen nousun syytä ei nyt tehtyjen selvitysten yhteydessä saatu selvitettyä. Oletuksena kuitenkin on, että päiväaikaan muualle rakennukseen kertynyt hiilidioksidi tasaantui yöaikaan rakennuksen sisällä, aiheuttaen edellä mainitun ilmiön. Syys-, talvi- ja kevätkaudella (viikot 33–17) yöaikaista nousua ei mittaustuloksissa esiintynyt.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vinha et al. 2019. **Uusien ja korjattujen palvelurakennusten kenttämittaukset COMBI-tutkimushankkeessa.** [Julkaistaan 2019]

Tohtorikoulutettava Anssi Laukkarinen (anssi.laukkarinen@tuni.fi)
Tutkimusapulainen Antti Kauppinen (antti.kauppinen@tuni.fi)



Sisäilman radonpitoisuudet palvelurakennuksissa

Radonpitoisuudet voivat vaihdella suuresti eri puolilla rakennusta.

Ilmanvaihtokoneen pysähtyessä radonpitoisuudet voivat nousta korkeiksi; koneen käynnistyessä pitoisuudet laskevat nopeasti.

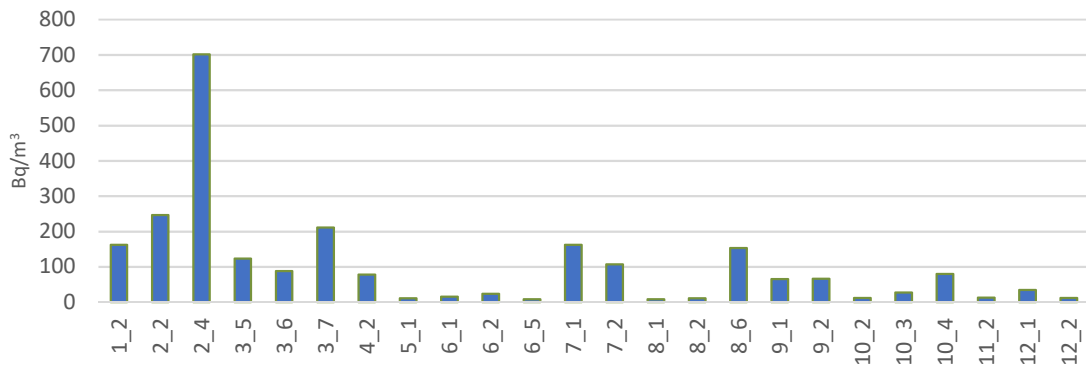
Tausta ja tavoitteet

COMBI-hankkeen kenttämittauksissa mitattiin sisäilman olosuhteita palvelurakennuksissa ja sisäilman radonpitoisuudet olivat yksi tarkasteltava suure. Radonpitoisuuksia mitattiin radonpurkeilla marras-huhtikuussa talvikausina 2016-2017 ja 2017-2018. Kohteet sijaitsivat Pirkanmaan ja Helsingin seudulla. Radonpurkkimittauksia tehtiin yhteensä 24 kohteesta 49 kappaletta, joiden lisäksi suoritettiin jatkuvatoimisia radonpitoisuuden mittauksia. Jatkuvatoimisten mittausten kohteiksi valittiin radonpurkkimittausten tulosten perusteella 13 tilaa yhdeksästä kohteesta. Yhteensä tutkittuja rakennuksia oli 22, joista kahdessa uudis- ja vanhaosa luokiteltiin erillisiksi uudis- ja korjauskohteiksi.

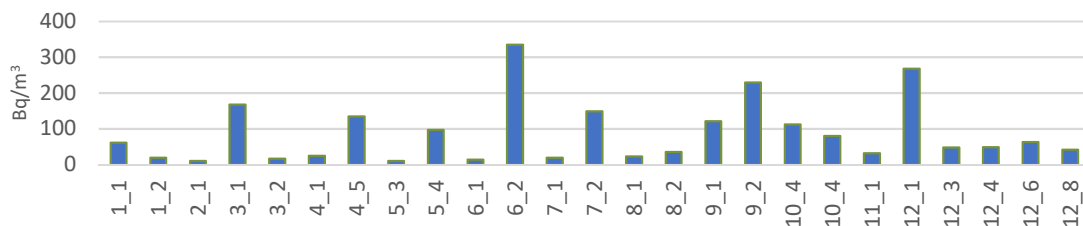
Radonpitoisuudelle on annettu erillaisia toimenpide- ja tavoitearvoja; STUKlex:n ohjeessa ST12.1 on annettu toimenpidearvoja työpaikkojen, kuten päiväkotien ja koulujen hengitysilman radonpitoisuudelle. Tavoitearvoja sisäilman radonpitoisuudelle on annettu sisäilmastolukituksessa 2018.

Tulokset ja johtopäätökset

Radonpurkeista saaduista tuloksista 19/24 kohteen pitoisuudet olivat alle 200 Bq/m³ pitoisuuden (kuvat 1 ja 2). Näistä 10/24 kohdetta alitti 100 Bq/m³ pitoisuuden.

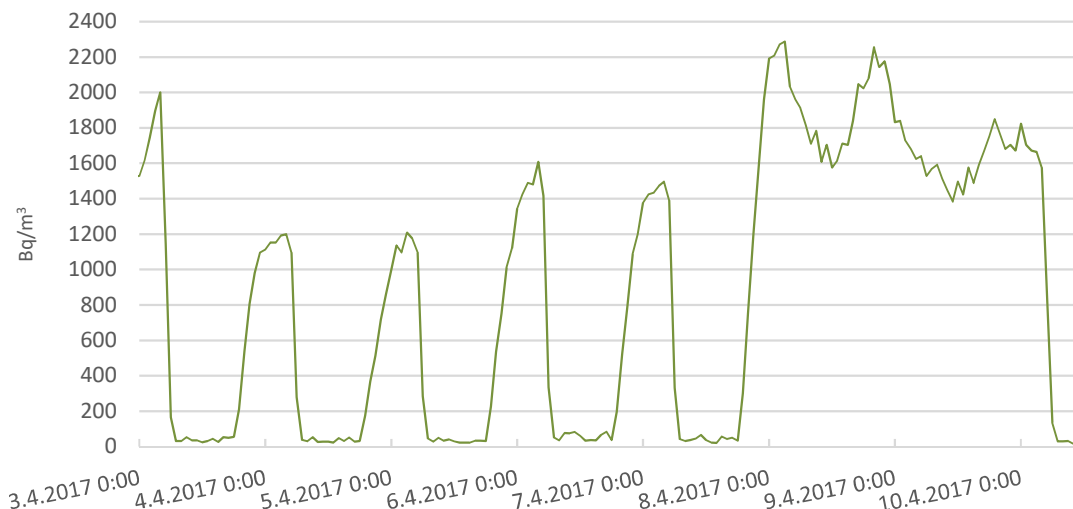


Kuva 1. Korjauskohteiden radonpitoisuudet. Ensimmäinen numero tarkoittaa kohdetta ja jälkimmäinen mittauspistettä.



Kuva 2. Uudiskohteiden radonpitoisuudet. Ensimmäinen numero tarkoittaa kohdetta ja jälkimmäinen mittauspistettä.

Yhdessä kohteessa yksittäinen mittaustulos ylitti 400 Bq/m³ toimenpiderajan. Kyseiseen tilaan tehtiin jatkuvatoiminen mittaus (kuva 3).



Kuva 3. Jatkuvatoiminen radonpitoisuuden mittaus, kaaviossa on esitetty korjauskohteen tilasta K_2_4 mitattuja pitoisuuksia viikon ajanjaksolta. Radonpitoisuus putoaa hyvin matalalle tasolle ilmanvaihdon ollessa päivisin päällä.

Korkeiden pitoisuuksien kohdalla ilmanvaihdon ja pitoisuuksien yhteys on jatkuvatoimisissa mittauksissa selkeästi havaittavissa. Ilmanvaihtokoneen mennessä päälle aamulla pitoisuudet laskevat ja nousevat koneen sammussa yöksi. Useissa tapauksissa rakennuksissa oli käynnissä öisin ilmanvaihto erillispoistojen avulla, mutta korjauskohde 2 (kuva 3) oli tässä suhteessa poikkeustapaus, jolloin ilma ei vaihtunut ilmapuotoja lukuun ottamatta arkiöisin ja viikonloppuisin ilmanvaihtokoneiden sammussa lainkaan. (kuva 3)

Tutkittujen kohteiden radonpitoisuudet olivat suurimmaksi osaksi alle 200 Bq/m³. Yhdessä kohteessa yhden radonpurkin tulos nousi yli 400 Bq/m³, joka voidaan osaltaan selittää ilmanvaihdon puutteellisella toiminnalla. Ilmanvaihdolla voidaan kuitenkin merkittävästi madaltaa sisäilman radonpitoisuuksia. Ilmanvaihtokoneiden ollessa päällä, pitoisuudet laskivat nopeasti ja pysyivät alhaisella tasolla.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vinha et al. (n.d.) **Uusien ja korjattujen palvelurakennusten kenttämittaukset COMBI-tutkimushankkeessa**. Tampereen yliopisto, rakennustekniikan yksikkö, rakennusfysiikka. [julkaistaan 2019]

Tutkimusapulainen, RI Antti Kauppinen (antti.kauppinen@tuni.fi)
Projektitutkija, DI Eero Tuominen (eero.tuominen@tuni.fi)

Koulujen ja päiväkotien energiankulutus Suomen rakennuskannassa

Energiankulutuksen vaihtelu olemassa olevien koulujen ja päiväkotien kesken on suurta.

Koulujen ja päiväkotien lämpöenergiankulutus on laskenut vähemmän, kuin mitä energiatehokkuusmääräysten vaatimukset ovat muuttuneet.

Sähköä käytetään uudemmissa kouluissa enemmän kuin vanhoissa, mutta päiväkodeissa sähkönkulutus ei riipu rakennusvuodesta.

Lattiapinta-alan suuruusluokka olisi perusteltua ottaa huomioon energiatehokkuusvaatimuksissa myös koulujen ja päiväkotien osalta.

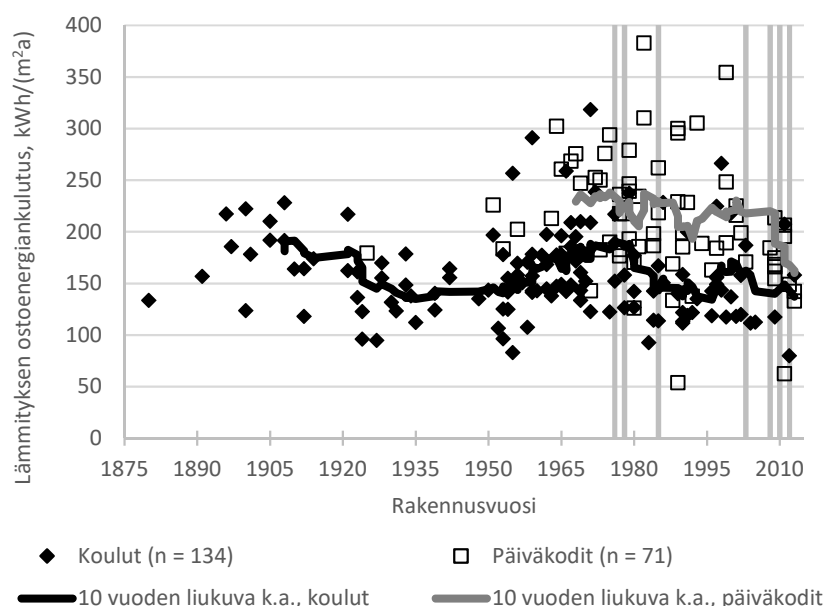
Tausta ja tavoitteet

Olemassa olevan rakennuskannan energiankulutuksen tunteminen on tärkeää, koska se toimii lähtökohtana korjausrakentamisen osana toteutettavalle energiatehokkuuden parantamiselle ja samalla antaa tietoa uudisrakentamiselle asetettavien odotusten toteutumisesta. Lattiapinta-alaa kohti laskettu energiankulutus ei ole aina paras suure rakennusten energiatehokkuuden vertailemiseksi, mutta se on kuitenkin hyvin yleisesti käytetty ja laskettavissa isollekin määrälle rakennuksia.

Isoon otokseen perustuvan kokonaiskuvan muodostamiseksi COMBI-hankkeessa kerättiin Helsingissä ja Tampereella sijaitsevien 134 koulun ja 71 päiväkodin lämmön ja sähkön toteutuneet kulutustiedot vuodelta 2014.

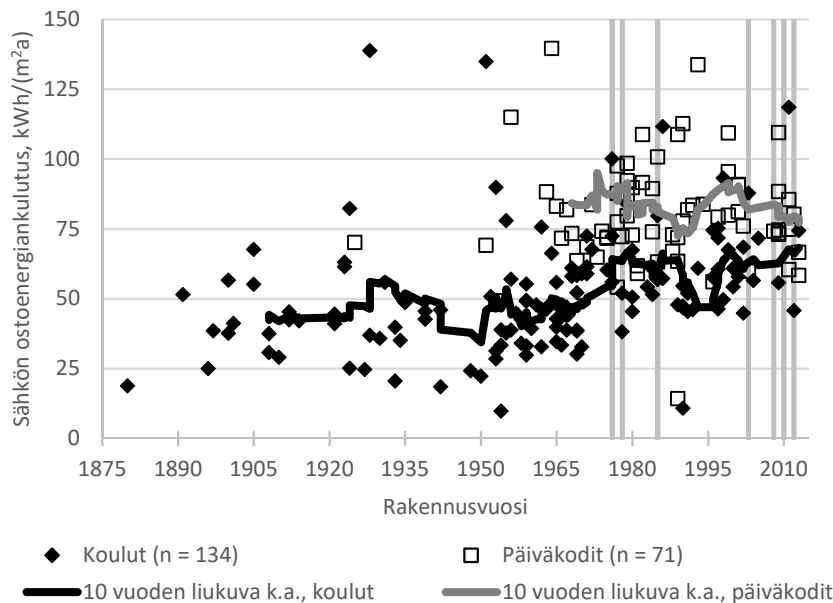
Tulokset ja johtopäätökset

Kuvassa 1 esitettujen kaukolämmön kulutustietojen perusteella lämmityksen ostoenergiankulutus oli uusissa kouluissa ja päiväkodeissa noin 25–35 % alhaisempi, kuin 1970-luvun alussa rakennetuissa rakennuksissa. Energiatehokkuusvaatimuksissa eri vuosina asetettujen vertailuarvojen muutosten perusteella lämmitysenergiankulutuksen olisi pitänyt laskea tätä enemmän.



Kuva 1. Koulujen ja päiväkotien normeerattu lämmityksen ostoenergiankulutus rakennusvuoden mukaan.

Kuvan 2 perusteella uudemmat koulurakennukset kuluttivat enemmän sähköä vanhempiin koulurakennuksiin verrattuna. Samanlaista selvää muutosta ei kuitenkaan ollut havaittavissa päiväkotien osalta.



Kuva 2. Koulujen ja päiväkotien sähkön ostotoenergiankulutus rakennusvuoden mukaan.

Kuvissa 1 ja 2 näkyvä ero koulujen ja päiväkotien ostotoenergian ominaiskulutusten välillä on osittain selitettävissä rakennusten koolla: Koulujen lattiapinta-ala vaihteli välillä noin 1400–9900 m², kun taas päiväkotien lattiapinta-alan vaihteluväli oli 510–1600 m² (5 %–95 % persentiilit), eli koulut olivat lattiapinta-alaltaan noin 3–6 kertaa päiväkoteja suurempia. Kuvassa 1 näkyvä uusien päiväkotien lämmön ostotoenergiankulutuksen jyrkkä pieneneminen selittyy osaltaan niiden vanhempien rakennuksia suuremmalla koolla.

Lämmön ja sähkön ostotoenergiankulutuksen vaihteluväli on suuri, eli esimerkiksi samanikäisten rakennusten ominaisenergiankulutukset voivat poiketa toisistaan paljon. Vanhempien ja uusien rakennusten lämmitysenergiankulutuksen samankaltaisuuden täytyy kompensoitua energiankulutukseen liittyvien tekijöiden kesken, kuten ilmanvaihdon määrän ja lämmön talteenoton hyötysuhteen, rakennuksen ilmatiivyyden ja sisäilman lämpötilan erojen vaikutuksesta. Pelkästään rakennuksen lattiapinta-alan tai rakennusvuoden perusteella ei ole mahdollista määrittää tarkasti yksittäisen kohteen energiankulutusta. Näistä syistä johtuen energiatehokkuuden tarkka arviointi edellyttää käytännössä kohdekohtaisten teknisten ratkaisujen, olosuhteiden ja käytön huomioon ottamista.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Ruusala, A., Laukkanen, A. & Vinha, J. 2018. **Energy consumption of Finnish schools and daycare centers and the correlation to regulatory building permit values.** Energy Policy, Vol 119, pp. 183–195, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.029>

Ruusala, A. 2016. **Koulujen ja päiväkotien laskennallinen ja toteutunut energiankulutus.** Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 73 s. + 8 liites. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttv-201605254140>

Tohtorikoulutettava Anssi Laukkanen (anssi.laukkanen@tuni.fi)



Koulujen ja päiväkotien E-lukulaskennan mukainen ja toteutunut ostoenergiankulutus

Tutkimuksessa tarkastellun otoksen perusteella koulujen ja päiväkotien toteutunut ostoenergiankulutus on keskimäärin selvästi suurempi, kuin E-lukulaskennan (2012) mukainen ostoenergiankulutus.

Eroja oli erityisesti lämmön kulutuksessa, jossa toteutunut ostoenergiankulutus oli keskimäärin 50 % laskettua suurempi. Sähkön osalta vastaava luku oli 15 %.

Rakennusten energiankulutuksen laskennassa tulisi kiinnittää huomiota erityisesti lähtötietojen oikeellisuuteen.

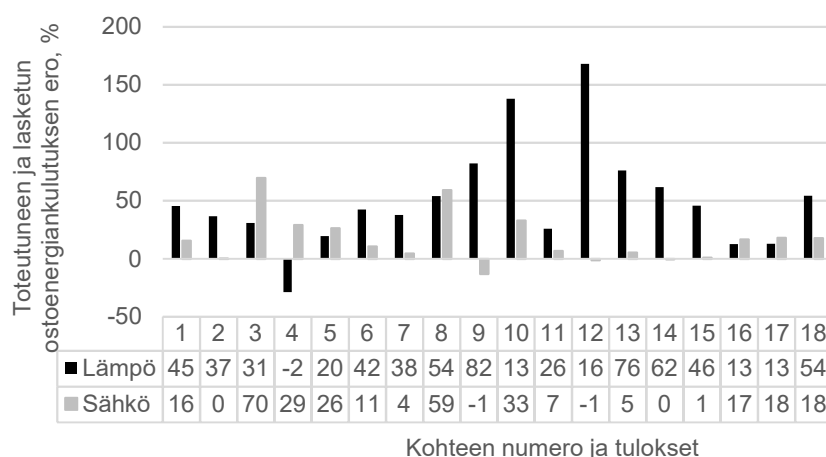
Tausta ja tavoitteet

Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen ja energiankulutuksen pienentäminen edellyttävät tyypillisesti erilaisia vertailulaskelmia, joilla selvitetään vaihtoehtoisten toimenpiteiden energiatehokkuusvaikutuksia. Rakennusten energiankulutuslaskentaa vaaditaan myös rakennusten energiatehokkuuteen liittyvien määräysten toteutumisen osoittamiseksi. Erilaisten vertailulaskelmien tekeminen on hyödyllisintä silloin, kun laskelmilla saadaan tarkka ja oikea kuva eri toimenpidevaihtoehtojen vaikutuksista. Toisaalta taas epätarkat laskentatulokset voivat ohjata valitsemaan kustannustehottomia tai muutoin ei-optimaalisia vaihtoehtoja.

Tätä taustaa vasten COMBI-tutkimushankkeessa laskettiin 18 vuosina 2005–2014 rakennetun koulun ja päiväkodin otokselle kunkin rakennuksen lämmön ja sähkön ostoenergiankulutus, joita sitten verrattiin kohteiden toteutuneeseen kulutustietoon. Laskenta tehtiin sekä kuukausitason laskentamenetelmällä, että simuloimalla koko kohderakennukset. Kunkin kohteen rakenteiden ja teknisten järjestelmien lähtötiedot saatiin COMBI-tutkimushankkeen yhteistyötahoilta, minkä lisäksi puuttuvia tietoja täydennettiin muista energialaskentaan liittyvistä lähteistä. Kohteiden käyttö määräytyi energiatehokkuusmääräyksissä esitetyn vakioidun käytön mukaan.

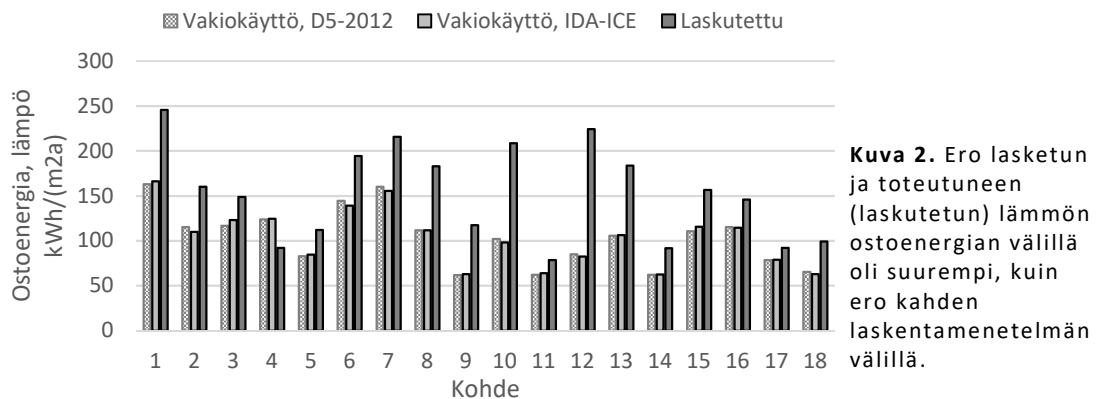
Tulokset ja johtopäätökset

Tulosten perusteella toteutuneet ostoenergiankulutukset olivat selvästi E-lukulaskennan mukaisia ostoenergiankulutuksia suurempia. Ero oli suuri erityisesti lämmitysenergian osalta. Prosentuaaliset erot toteutuneen ja lasketun ostoenergiankulutuksen välillä on esitetty kuvassa 1. Laskenta on tehty kuukausitason laskentamenetelmällä.



Kuva 1. Toteutuneen ja lasketun ostoenergiankulutuksen välinen ero prosentteina. Lähes kaikissa kohteissa lämpöä ja sähköä kului laskettua enemmän. Laskenta on tehty kuukausitason laskentamenetelmällä ja uudisrakennusten vakioidulla käytöllä.

Lämpöenergian osalta erotusten keskiarvo ja 90 % vaihteluväli olivat +50 (5—140) % ja sähkön osalta +15 (-5—60) %, jossa arvot on pyöristetty viiden prosenttiyksikön tarkkuuteen. Tarkasteltujen rakennusten ostoenergiankulutus laskettiin myös IDA-ICE –ohjelman avulla simuloimalla. Kohteiden lämmön ostoenergia on esitetty kuvassa 2.



Simuloinnin ja kuukausitason laskentamenetelmien tulosten ero oli sekä lämmön- että sähkönkulutuksen tapauksessa pieni. Näin ollen erot laskettujen ja toteutuneiden ostoenergiankulutusten välillä eivät johtuneet ensisijaisesti käytetystä laskentamenetelmästä, vaan laskennan lähtötiedoista ja laskettavien tapausten luonteesta. On kuitenkin tärkeää huomata, että simulointityökalut mahdollistavat laskennan eri lähtötietojen muokkaamisen ja ilmiöiden mallintamisen huomattavasti kuukausitason laskentaa yksityiskohtaisemmin, jolloin mahdollisuudet laskentamallien kalibrointiin paranevat. Tämän edellytyksenä on kuitenkin tarkoitukseen räätälöidyt työkalut ja niiden asianmukainen käyttö.

Energiatehokkuuden parantaminen laskennallisesti paransi myös toteutunutta energiatehokkuutta, mutta erot toteutuneiden ja laskennallisten arvojen välillä kasvoivat sekä prosentuaalisesti että kWh/(m², vuosi) -arvoina siirryttäessä kohti alhaisemman energiankulutuksen rakennuksia.

Laskentamenetelmästä riippumatta uusien energiatehokkaiden rakennusten energiankulutuksen laskennassa on tarvetta kiinnittää erityistä huomiota varsinkin lämmitysenergiankulutukseen liittyvien lähtötietojen oikeellisuuteen.

Lisätietoja

Ruusala, A., Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2018. **Energy consumption of Finnish schools and daycare centers and the correlation to regulatory building permit values.** Energy Policy, Vol 119, pp. 183—195, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.029>

Ruusala, A. & Vinha, J. 2017. **Koulujen ja päiväkotien laskettu ja toteutunut energiankulutus.** Rakennusfysiikka 2017: Uusimmat tutkimustulokset ja käytännön ratkaisut. Tampere. 8 s.

Ruusala, A., Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2019. **Comparison between calculated and billed building energy consumption values of schools and daycare centers.** CESBP2019. *Abstract accepted*

Ruusala, A. 2016. **Koulujen ja päiväkotien laskennallinen ja toteutunut energiankulutus.** Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. 73 s. + 8 liites. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ttt-201605254140>

Tohtorikoulutettava Anssi Laukkarinen (anssi.laukkarinen@tuni.fi)



Taloudellisuuslaskennan yhteiset peruseriaatteen

Eri laskijoiden tekemissä taloudellisuuslaskelmissa pitää käyttää samoja peruseriaatteen, jos niitä halutaan vertailla ja halutaan helpottaa niiden hyödyntämistä päätöksenteossa.

Yksi suurimmista ja hankalimmista laskelmien tuloseria aiheuttavista tekijästä toimenpiteiden taloudellisuustarkasteluissa on yleiskustannusten määrittäminen.

Tausta ja tavoitteet

Jotta eri tahojen taloudellisuuslaskelmat ja niiden tulokset olisivat vertailukelpoisia, pitää ne tehdä samoilla pääperiaatteilla ja samoja talouslaskennan peruslähtöarvoja käyttäen. Tässä on esitetty COMBI –hankkeessa sovitut periaatteen. Näissä periaatteissa on yleisesti eroja ja virheitäkin eri laskelmissa, mikä johtaa erilaisiin kannattavuustuloksiin.

Virheellisiä tuloksia syntyy esimerkiksi, jos samassa laskelmassa käytetään sekä nimellisiä suureita että reaalisia suureita. Arvonlisäverottomia kustannuksia käytettäessä pitää muistaa käyttää myös vastaavaa energian hintaa eli kaikki kustannukset pitää olla ilman arvonlisäveroa.

Tulokset

Taloudellisuuslaskelmien peruseriaatteen COMBI-hankkeessa:

- Laskenta reaaliarvoilla (inflaatio ei mukana)
- Kaikki kustannukset ilman arvonlisäveroa (ALV 0%). Huomaa myös energian hinnan osalta.
- Kustannusoptimaalisuusperiaate. Tarkastelujakso 20 vuotta, käyttöikä 40 vuotta (oletettu perusparannusväli). Muista lisätä jäännösarvot.
- Yleiskulut mukana kustannuksissa (ks. "Yleiskustannusten käsittely")
- Laskenta reaalisilla laskentakoroilla 1...3...5 %. Perusarvo keskimmäisenä.
- Sähkön hinta erikseen siirron (teho) ja energian osalta (ks. "Energian hinta")
- Sähköenergian ja siirron hinta Tampereen Sähkölaitoksen hintatason mukaan
- Kaukolämpöenergian hinnat (energia kuukausittain ja vuosimaksu) Tampereen Kaukolämmön mukaan.
- Kustannustaso pitää mainita (COMBI-hankkeessa tammikuu 2016, jos muuta ei ole mainittu)
- Energian ja siirron reaaliset hintakehitysskenaariot 0...2...4 %/vuosi (ks. "Energian hinta")

Kustannusten ja yleiskustannusten käsittely COMBI-hankkeessa:

Kustannustasona käytetään tammikuun 2016 kustannustasoa, jos muuta ei ole mainittu.

Yleiskustannukset pitää ottaa huomioon. Saadut kustannustiedot saattavat sisältää osan yleiskustannuksista, jolloin vain puuttuvat yleiskustannusosuudet lisätään.

Yleiskustannusten määrittämisen pohjana käytetään lähteenä ”Haahtela, Kiiras. Talonrakennuksen kustannustieto 2015” -julkaisua. Rakennusosa-arviolaskennassa ”Rakennusosien ja tekniikkaosien” kustannusten 100 päälle lisätään seuraavat yleiskustannusosuudet:

- | | |
|---|------|
| a) Työmaapalvelut (työnaikaiset rakenteet ja asennukset, käyttöaineet ja energia, muut työmaakustannukset) | 5 % |
| b) Työmaakate (hankinnat, työmaan hallinto ja kate-erät). Kasvukeskukset. | 10 % |
| c) Työnjohdon osuus on suuruusluokaltaan 4 %. Lähteessä on esitetty arvioita työnjohdon kustannuksista erilaisissa kohteissa. | 4 % |
| d) Rakennuttaminen (projektinjohto) (lähteessä hankekoon mukaan 4,4 – 6,4) | 5 % |
| e) Rakennussuunnittelu (lähteessä hankekoon ja vaativuuden mukaan 6,9 – 10,1) | 9 % |

Yleiskustannukset lasketaan seuraavalla tavalla:

$$100 * (1 + a + b + c) * (1 + d + e)$$

$$\text{Esimerkiksi: } 100 * (1 + 0,05 + 0,1 + 0,04) * (1 + 0,05 + 0,09) = 136$$

Korjauskohteissa esimerkiksi ”paikalleen asennettuna” toteutetun hankinnan lisättävä yleiskuluosuus voi olla vain rakennuttamisen ja suunnittelun yleiskuluosuus eli 14 %. Tapauskohtaisesti pitää kuitenkin tarkistaa, mitä yleiskustannusosuuksia sisältyy tai ei sisälly saatuun kustannustietoon ja tämän mukaan lisätään puuttuvat yleiskustannusosuudet.

Todellinen vaikutus yleiskustannuksiin vaihtelee hyvin paljon. Se voi olla yksittäisen rakennusosan tai laitteen osalta hyvin pieni. Pyrittäessä poikkeuksellisen hyvään energiatehokkuuteen erikoisilla ratkaisulla voi yleiskustannus koko hankkeen tasolla olla suurempi kuin keskimääräisillä yleiskuluprosenteilla laskien.

Energian hinta:

- Peruslaskelmassa kaikilla energiamuodoilla ja siirrolla 2%/a reaalin hinnannousu
- Herkkyystarkastelussa kaikilla alarajana 0%/a kasvu
- Ylärajana kaukolämmöllä reaalin 4%/a
- Sähköllä energian osalta (ilman siirtoa) ylärajana reaalin 2%/a
- Sähköllä siirron osalta ylärajana reaalin 4%/a

Lisätietoja ja yhteydenotot

Projektipäällikkö Juhani Heljo (juhani.heljo@tuni.fi)



KOP-COMBI kustannusoptimointityökalu

Muihin kuin omaan rakennuskohteeseen tehtyjen laskelmien hyödyntäminen päätöksenteossa sisältää paljon epävarmuuksia.

Omat karkeatkin yksinkertaiset laskelmat tuovat laskelmiin läpinäkyvyyttä ja ymmärrettävyyttä.

Avuksi omien laskelmien tekemiseen tarvitaan laskentaohjelmia.

Tausta ja tavoitteet

Kustannusoptimaalisuuslaskentaa on ryhdytty käyttämään taloudellisuustarkasteluissa sen jälkeen, kun EU:n energiatehokkuusdirektiivi otti käsitteen käyttöön liittyen energiamääräysten kustannusoptimaalisuustarkasteluihin. Tähän laskentamenettelyyn on viitattu myös Suomen rakentamismääräyksissä korjausrakentamismääräysten yhteydessä. Laskentaa on sovellettu myös "Lähes nollaenergiämääräyksiin" liittyvissä taustaselvityksissä.

Tämän kustannusoptimaalisuuslaskurin tavoitteena on mahdollistaa laskelmien tekeminen taulukkolaskentaohjelmalla (Microsoft Excel). Kustannusoptimaalisuuslaskelmia on COMBI-hankkeessa tehty runsaasti MOBO/IDA-ICE -työkalulla. Se on kuitenkin selvästi vaativampi työkalu eikä se ole välttämättä riittävän helppokäyttöinen, havainnollinen ja avoin päätöksentekotyökaluksi laajaan käyttöön. Taulukkolaskentaohjelman käyttäminen mahdollistaa läpinäkyvyyden ja joustavan käytön, mutta tuo myös rajoitteita laskentaan. Käytännössä tarvitaan kuitenkin erilaisia ja eritasoisia laskentatyökaluja, jotta elinkaarikustannuslaskenta saadaan yleistymään.

Tulokset

Laskuri on toteutettu Excelissä moduuliperiaatteella. Tämä mahdollistaa myös laskurin osittaisen käytön. Päämoduuleita ovat:

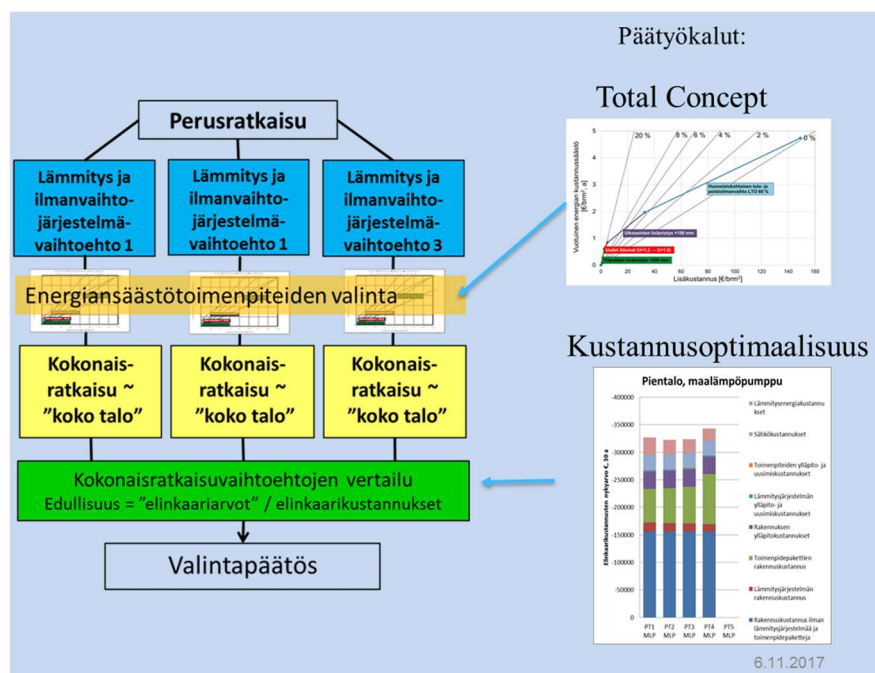
1. Toimenpiteiden tarkastelu ja vertailuun otettavien toimenpidepakettien valinta. Tästä Ruotsissakin käyttöön otetusta menettelystä kutsutaan myös nimitystä "Total Concept"
2. Elinkaarikustannusten laskenta lämmitystavoittain ja toimenpidepaketeittain
3. Toimenpidepakettien taloudellisuuden vertailu keskenään sisäisen koron (korkotuoton) perusteella
4. Kustannusoptimaalisuuksien (elinkaarikustannusten) vertailu lämmitystavoittain ja toimenpidepaketeittain

Laskentaprosessin kuvaus:

1. Strategia ja tavoitteet
2. Valitaan tarkasteltavat järjestelmäkokonaisuudet (lämmitys ja ilmanvaihto)
3. Valitaan tarkasteltavat energiansäästötoimenpiteet "portaittain" (esim. lisäeristys 100mm, lisäeristys 100-200mm). Yleensä kolme "parannusporrasta" riittää.
4. Toimenpiteet järjestetään kannattavuusjärjestykseen järjestelmittäin. Tässä vaiheessa voi käyttää yksinkertaisia energialaskentamenetelmiä.

5. Valitaan järjestelmittain toimenpidepaketit siten, että toimenpiteet ovat kannattavuudeltaan suunnilleen samalla tasolla. Teknisten erojen, laatuerojen tai muiden syiden takia voi tässä vaiheessa muuttaa järjestystä.
6. Lasketaan toimenpidepakettien elinkaarikustannukset ohjeistetulla tavalla ja esitetään ne havainnollisesti.
7. Tehdään valinta ottaen huomioon myös arvotekijät kuten esim. sisäilmaolosuhteet, helppokäyttöisyys, lämpöviihtyvyys ym. Voi käyttää tarvittaessa yksinkertaista arvolaskuria.

Laskennan perusperiaatteet pitää päättää ja kuvata ennen laskelmien tekoa. COMBI-hankkeessa valitut periaatteet on kuvattu tulokortissa ”Taloudellisuuslaskennan yhteiset perusperiaatteet”. Haluttaessa vertailukelpoisia talouslaskelmia, pitää ne tehdä samoilla perusperiaatteilla. Lisäksi tarvittaessa voi tehdä muunkinlaisia tarkasteluja.



KOP-COMBI kustannusoptimaalisuuslaskennan rakenne ja pääosat. Valittuihin järjestelmiin valitaan taloudellisuuden perusteella energiansäästötoimenpiteet toimenpidepaketteina. Pakettien valintaan voi käyttää erillistäkin laskentaohjelmaa. Lopuksi syntyneitä kokonaisuuksia verrataan elinkaarikustannusten perusteella.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Heljo, J., 2018. **KOP-COMBI kustannusoptimaalisuuslaskuri.** Tampere 2018.

Projektipäällikkö Juhani Heljo (juhani.heljo@tuni.fi)

Kustannusoptimaaliset lämmitys- ja jäähdytysratkaisut palvelurakennuksissa

Lämpöpumppuratkaisut ovat kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaimpia lämmitysvaihtoehtoja.

Tutkimuksen tausta

Kaikkien uusien kunnallisten palvelurakennusten tulee täyttää lähes nollaenergiarakennuksen kriteerit vuoden 2019 alusta alkaen. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli määrittää kustannusoptimaalisia lämmitys- ja jäähdytysratkaisuja uusille sekä saneerausvaiheessa oleville palvelurakennuksille kiinteistön omistajan näkökulmasta. Tutkittavina kohteina käytettiin Luhtaan päiväkotia ja Vehmaisten koulua, jotka ovat Tampereella sijaitsevia uudiskohteita, sekä Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-taloa, joka edustaa saneerauskohdetta.



Luhtaan päiväkoti (Lähde: BST-Arkkitehdit Oy).

Tutkimuksessa etsittiin dynaamista IDA-ICE simulointimenetelmää hyödyntäen lämmitys- ja jäähdytysratkaisuja, joiden E-luku₂₀₁₂ sekä elinkaarikustannukset ovat mahdollisimman pieniä. Elinkaarikustannukset laskettiin 20 vuoden ajalle nykyarvoon muutettuna. Lämpöpumppujen kustannusoptimaalista tehomitoitusta tutkittiin lisäksi monitavoiteoptimointia käyttäen. Tutkittujen kohteiden käyttöä mallinnettiin FinVAC-käyttöprofiilien ja rakennuksen käyttäjien haastattelujen pohjalta siten, että rakennuksen simuloitu käyttö vastaisi mahdollisimman hyvin tutkittujen rakennusten todellista käyttöä. Laskelmissa sähkön ja kaukolämmön hinnat perustuivat Tampereen sähkölaitoksen vuoden 2015 hintatasoon sekä arvioituun hintakehitykseen (kts. tulokortti: Taloudellisuustarkastelujen toteutusperiaatteet ja lähtötiedot).

Tutkituissa kohteissa simuloitiin seuraavia järjestelmävaihtoehtoja:

- Kaukolämpö sekä koneellinen jäähdytys kompressorikylmälaitteilla
- Kaukolämpö sekä kaukojäähdytys (vain saneerauskohde)
- Maalämpöpumppu sekä vapaajäähdytys maaperän avulla
- Ilma-vesilämpöpumppu sekä koneellinen jäähdytys kompressorikylmälaitteilla
- Puupellettilämmitys sekä koneellinen jäähdytys kompressorikylmälaitteilla

Lämpöpumppujärjestelmien apulämmitysvaihtoehtoina tutkittiin sekä sähköllä että kaukolämmöllä toteutettuja vaihtoehtoja. Maalämpöpumpun kustannusoptimaalista

tehomitoitusta tutkittiin Luhtaan päiväkodin tapauksessa sekä vastaavasti ilma-vesilämpöpumpun mitoitusta vanhainkodin tapauksessa.

Tutkimustulokset ja suositukset

Tutkituista vaihtoehdoista sekä päiväkodin että koulun kustannustehokkain lämmitys- ja jäähdytysratkaisu oli sähköisellä apulämmityksellä varustettu maalämpöpumppu ja maalämpöpumpun porakaivoja hyödyntävä vapaajäähdytys. Vastaavasti vanhainkodin kustannustehokkain ratkaisu oli sähköisellä apulämmityksellä varustettu ilma-vesilämpöpumppu ja vesilauhdutteisella kompressorikylmälaitteella toteutettu jäähdytys. Ilma-vesilämpöpumppu oli kustannustehokkaampi lämmitysratkaisu vanhainkodissa kuin maalämpöpumppu selvästi pienemmän investointikustannuksen vuoksi.

Tutkituissa kohteissa kaukolämpö ei ollut kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokas päälämmitysjärjestelmä, eikä se myöskään ollut lämpöpumppujen rinnalla kustannustehokas apulämmitysjärjestelmä. Herkkyystarkasteluissa korkotason, sähkön hinnan ja energian hintakehityksen eri vaihtoehdot eivät muuttaneet tutkittujen järjestelmävaihtoehtojen keskinäistä järjestystä.

COMBI-hankkeessa julkaistun Sankelo et al. (2018) tutkimuksen mukaan kiinteistön omistajan näkökulmasta Luhtaan päiväkodin kustannusoptimaalinen sähköisellä apulämmityksellä varustetun maalämpöpumpun tehomitoitus oli noin 30 % vuotuisesta maksimi lämmitystehontarpeesta, kun lämpöpumppuja myyvän yrityksen kohteeseen suosittelema tehomitoitus oli 75 %. Vastaavasti jatkuvasti käytössä olevan vanhainkodin ilma-vesilämpöpumpun kustannusoptimaalinen tehomitoitus oli noin 50 % valmistajan suosituksen ollessa 60 %.

Kun kustannus- ja energiatehokkuutta tarkastellaan kiinteistön omistajan näkökulmasta, kannattaisi lämpöpumppu mitoittaa tutkitun päiväkodin kaltaisessa rakennuksessa, jonka käyttö on varsin jaksottaista ajoittuen vain arkipäiviin, huomattavastikin pienemmäksi kuin nykyisin suositellaan. Suomen energiajärjestelmän näkökulmasta tämä saattaa kuitenkin olla pulmallista, koska alimitoitettut lämpöpumput saattavat lisätä talviaikaan tehonkulutuksen piikkejä, mikäli lämpöpumppua ei ole varustettu älykkäällä kysyntäjousto-ohjauksella ja riittävän suureksi mitoitettulla varaajalla. Lämpöpumppujen älykkäällä ohjauksella ja varaajan riittävällä mitoituksella voidaan vähentää lämpöpumppujen käyttökustannuksen kasvua, mikäli esim. sähkön tehomaksut nousisivat merkittävästi tulevaisuudessa, joten asia on syytä ottaa huomioon lämpöpumppuratkaisuja suunniteltaessa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Nyman, J., 2016. **Cost Optimal Heating and Cooling Systems in Nearly Zero Energy Service Buildings**. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Espoo. [Linkki diplomityöhön](#)

Sankelo, P., Jokisalo, J., Nyman, J., Vinha, J. & Sirén, K., 2018. **Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate**. International Journal of Sustainable Energy.

Vanhempi tutkija Juha Jokisalo (juha.jokisalo@aalto.fi)



Aurinkosähkö kannattaa etenkin vanhainkodeissa

Aurinkosähkön omatuotanto kannattaa etenkin vanhainkodeissa tai muissa palvelurakennuksissa, joita käytetään ympäri vuoden.

Optimaaliset aurinkosähköpaneelien asennuspinta-alat voivat olla useita satoja neliömetrejä. Tämä tulisi huomioida jo uusien palvelurakennusten suunnitteluvaiheessa.

Tutkimuksen tausta

Kaikkien uusien kunnallisten palvelurakennusten tulee täyttää lähes nollaenergiarakennuksen kriteerit vuoden 2019 alusta alkaen. Energiankäytön tehostamisen ja rakenteellisten ratkaisujen kuten paremman lämmöneristystason lisäksi rakennuksen E-lukua₂₀₁₇ voidaan pienentää hyödyntämällä rakennukseen kuuluvalla tai sen lähellä olevalla laitteistolla tuotettua uusiutuvaa energiaa siltä osin, kuin sitä käytetään rakennuksessa.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin aurinkosähkön tuotantoa kunnallisissa palvelurakennuksissa. Tutkittavina kohteina käytettiin Tampereella sijaitsevia Luhtaan päiväkotia, Vehmaisten koulua ja Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-taloa, joiden käyttö poikkeaa selvästi toisistaan. Tarkastelun kohteena ollut vanhainkoti on jatkuvasti käytössä oleva saneerauskohde, kun taas koulu ja päiväkoti ovat kesällä kiinni olevia uudisrakennuksia.

Tutkittujen kohteiden käyttöä mallinnettiin FinVAC-käyttöprofiilien ja rakennuksen käyttäjien haastattelujen pohjalta siten, että rakennuksen simuloitu käyttö vastaisi mahdollisimman hyvin tutkittujen rakennusten todellista käyttöä. Kaikkien kohteiden tapauksissa simuloidulla sähkönkulutuksella pyrittiin kuvaamaan rakennuksen sisällä toteutunutta kulutusta, mutta Luhtaan päiväkodin osalta tutkittiin lisäksi myös tapausta, jossa simuloitu sähkönkulutus kuvasi koko kiinteistön alueella toteutunutta mitattua kulutusta.

Erilaisia kohteita mallintamalla voitiin havaita, missä kohteissa aurinkosähkön tuotanto kannattaa parhaiten, niin taloudellisesti kuin myös rakennusten ostoenergiankulutuksen pienentämisen kannalta.

Rakennuksia tarkasteltiin simulaatioihin perustuvan monitavoiteoptimoinnin avulla. Optimoinnissa minimoitiin sekä rakennusten E-lukua₂₀₁₇ että elinkaarikustannuksia. Laskelmissa sähkön osto- ja myyntihinnat perustuivat Tampereen sähkölaitoksen vuoden 2015 hintatasoon sekä arvioituun hintakehitykseen (kts. tulostiet: Taloudellisuustarkastelujen toteutusperiaatteet ja lähtötiedot). Simulaatioissa käytetyt aurinkopaneelit oletettiin normaaleiksi, nykyisin helposti saatavilla oleviksi malleiksi.

Aurinkosähkön varastointia esimerkiksi kiinteistökohtaisilla akkuratkaisuilla ei tässä tarkastelussa otettu huomioon; tulevaisuudessa sellainen saattaa mahdollistaa entistä suurempaa aurinkosähkön tuotantoa kiinteistöissä.

Tutkimustulokset ja suositukset

Aurinkosähkön tuotanto pienensi rakennusten ostoenergiankulutusta ja siten myös E-lukua₂₀₁₇ kaikissa tutkituissa palvelurakennuksissa. Kustannusoptimaalinen aurinkopaneelien asennusala riippui kohteen sähkönkulutuksesta, joka määrää, kuinka suuri osuus tuotetusta sähköstä voidaan käyttää paikan päällä. Kun otettiin huomioon vain rakennusten sisätiloissa toteutunut

sähkönkulutus, tuotti aurinkosähköjärjestelmä taloudellista voittoa tutkituista kohteista ainoastaan vanhainkodissa 20 vuoden elinkaaritarkastelussa.

Aurinkosähkön tuotanto oli taloudellisesti kannattavinta juuri vanhainkodissa, koska rakennus on käytössä ympärivuotisesti ja suuri osa kesäaikaan käytetystä energiasta voitiin hyödyntää omaan käyttöön. Rakennuksen käyttöaikojen lisäksi aurinkosähkön kustannuksiin vaikutti rakennuksen lämmitystapa: aurinkosähkö oli kannattavampaa yhdistää lämpöpumppuratkaisuun kuin kaukolämpöön. Kustannusoptimaaliset asennusalat olivat verraten suuria.

Suurin taloudellinen voitto, 3,6 €/lattia-m² (37 €/PV-m²), saavutettiin vanhainkodille paneelialalla 461 m², paneelien kallistuskulmalla 48° ja yhdistettynä lämmöntuotantoon ilma-vesilämpöpumpulla. Suurimman taloudellisen tuoton tuovalla paneelialalla, joka oli 10 % kohteen lämmitetystä nettoalasta, myös vanhainkodin E-luku₂₀₁₇ pieneni 13 %. Aurinkopaneelit voivat kuitenkin tuoda taloudellista voittoa myös siinä tapauksessa, että vanhainkotiä lämmitetään kaukolämmöllä. Tällöin laskennallisesti suurin voitto oli 2,7 €/lattia-m² (35 €/PV-m²), ja se toteutui paneelialalla 360 m², joka oli 8 % kohteen lämmitetystä nettoalasta.

Kun aurinkosähkön tuotannon kannattavuutta tarkasteltiin Luhtaan päiväkodin tapauksessa koko kiinteistön alueella toteutuneen sähkönkulutuksen pohjalta, jolloin otettiin huomioon myös esim. autojen sähkötolppien sekä sadevesirännien ja portaiden sulatuslämmityksen sähkönkulutus, tuotti aurinkosähköjärjestelmä taloudellista voittoa myös päiväkodin tapauksessa sekä maalämpöpumpulla varustetussa tapauksessa (1,8 €/lattia-m², 21 €/PV-m²) että kaukolämmöllä varustetussa tapauksessa (1,6 €/lattia-m², 20 €/PV-m²). On mahdollista, että aurinkosähkön tuotannon laskennallinen kannattavuus olisi ollut parempi myös muissa tutkituissa kohteissa, jos laskelmissa olisi ollut mahdollista hyödyntää kiinteistön alueella toteutunutta sähkönkulutustietoa.

Tutkimuksen perusteella on suositeltavaa asentaa aurinkosähköä ensisijaisesti ympäri vuoden käytössä oleviin palvelurakennuksiin, kuten hoivakoteihin. Aurinkosähkön asennus ja sen vaatima suuri kattopinta-ala tulee ottaa huomioon jo uusien palvelurakennusten suunnitteluvaiheessa. Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa on syytä ottaa myös huomioon koko kiinteistön sähkönkulutus, sen sijaan, että otettaisiin huomioon vain rakennuksen sisätiloissa toteutuva sähkönkulutus.

Aurinkosähkön kannattavuus paranee myös koulussa ja päiväkodissa, mikäli rakennukset ovat käytössä suuremman osan kesäkaudesta. Aurinkosähkö voi siten olla kannattavampaa niissä päiväkodeissa, jotka ovat auki koko kesän. Kesällä olisi hyvä pitää avoinna ensisijaisesti sellaiset päiväkodit, joissa on otollisimmat olosuhteet paitsi lasten kesäulkoiluun, myös aurinkosähkön tuotantoon, eli aurinkosähköjärjestelmälle on riittävästi asennuspinta-alaa sopivassa suunnassa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Sankelo, P., 2016. **Optimal production and use of solar electricity in municipal nearly Zero Energy service buildings**. Diplomityö, Aalto-yliopisto & Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). [Linkki diplomityöhön](https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/diplomityöhön)

Vanhempi tutkija Juha Jokisalo (juha.jokisalo@aalto.fi)



Kustannusoptimaaliset suunnitteluratkaisut palvelurakennuksissa

Lämpöpumppu on tutkituissa kohteissa kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitysratkaisu kuin kaukolämpö.

Ulkoseinien lämmöneristystason parantaminen ei ole kustannustehokkain keino pienentää tutkittujen uudis- ja saneerauskohteiden energiankulutusta.

Tutkimuksen tausta

Kaikkien uusien kunnallisten palvelurakennusten tulee täyttää lähes nollaenergiarakennuksen kriteerit vuoden 2019 alusta alkaen. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli määrittää kustannusoptimaalisia suunnitteluratkaisuja uusille palvelurakennuksille sekä kustannusoptimaalisia energiakorjausvaihtoehtoja korjaustarpeessa oleville palvelurakennuksille kiinteistön omistajan näkökulmasta. Molemmissa tapauksissa tutkittiin myös paikan päälle sijoitettavien uusiutuvien energiantuottoratkaisujen kannattavuutta.

Tutkittavat esimerkkikohteet olivat Tampeerella sijaitseva Luhtaan päiväkotito (uudisrakennus, valmistunut 2012) ja samoin Tampereella sijaitseva Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo (saneerauskohte, rakennettu 1955). Molempien kohteiden osalta tarkasteltiin kahta päälämmitysjärjestelmää: kaukolämpöä ja lämpöpumppua. Päiväkodin tapauksessa tarkasteltiin maalämpöpumppua ja vanhainkodin tapauksessa ilma-vesilämpöpumppua. Molempien kohteiden tapauksissa tutkittiin vaipan lämmöneristystasoon, ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon sekä -ohjaukseen, valaistuksen ohjaukseen sekä kiinteistökohtaisiin aurinkolämpö- ja aurinkosähköjärjestelmiin liittyviä suunnitteluratkaisuja.

Tutkimuksessa käytettiin rakennussimulaatioihin perustuvaa monitavoiteoptimointia etsimällä ratkaisuja, joiden energiankulutus ja elinkaarikustannukset ovat mahdollisimman pieniä. Tutkimuksessa tarkasteltiin esimerkkikohteiden tavoite-energiankulutusta, joka on vuotuinen rakennuksen ostoenergian kulutus simuloituna mahdollisimman todenmukaisella rakennuksen käytöllä, sekä lisäksi päiväkodin tapauksessa myös E-lukua²⁰¹⁷. Ratkaisujen elinkaarikustannukset määritettiin 20 vuoden ajalle, mukaan lukien päälämmitysjärjestelmän kustannukset sekä energiakustannukset, kaikki nykyarvoon muutettuina. Herkkyystarkasteluja tehtiin pääasiassa päiväkodin kaukolämpötapaukselle. Optimoinnissa sähkön ja kaukolämmön hinnat perustuivat Tampereen sähkölaitoksen vuoden 2015 hintatasoon sekä arvioituun hintakehitykseen (kts. tulokortti: Taloudellisuustarkastelujen toteutusperiaatteet ja lähtötiedot).

Tutkimustulokset ja suositukset

Uuden päiväkodin suunnitteluratkaisut

Uudiskohdetta edustavan päiväkodin tapauksessa maalämpöpumppu oli kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö. Rakennuksen vaipan lämmöneristäminen Suomen rakentamismääräysten vertailutasoa paremmaksi ei ollut kustannustehokkain tapa pienentää rakennuksen energiankulutusta. Suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:

- Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
- Ilmanvaihdon tarpeenmukainen CO₂-ohjaus ja erillispoistojen lämmöntalteenotto
- Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen
- Energiatohokkaiden ikkunoiden asentaminen

Jos tutkitun kohteen energiankulutusta pyrittäisiin pienentämään edelleen kustannusoptimaalista tasoa paremmaksi, kustannustehokkainta olisi maalämpöpumpulla lämmitetyssä kohteessa investoida ensin energiatohokkaaseen ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja lisätä omaa aurinkosähkön tuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi lisätä aurinkolämmön tuotantoa ja parantaa vaipan lämmöneristystasoa vertailutasoa paremmaksi. Vastaavasti kaukolämmityssä kohteessa kannattaisi ensin investoida energiatohokkaaseen ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja sen jälkeen lisätä omaa aurinkosähkön- sekä lämmöntuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi parantaa vaipan lämmöneristystasoa vertailutasoa paremmaksi.

Vanhainkodin energiakorjausratkaisut

Saneerauskohtetta edustavan vanhainkodin tapauksessa ilma-vesilämpöpumppu oli kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö. Ulkoseinien lisälämmöneristäminen alkuperäistä tasoa paremmaksi ei ollut tutkituista vaihtoehdoista kustannustehokkain tapa parantaa kohteen energiatohokkuutta. Sen sijaan suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:

- Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
- Yläpohjan lisälämmöneristäminen
- Vanhojen ikkunoiden korvaaminen uusilla energiatohokkaila ikkunoilla
- Lämmöntalteenotolla varustetun koneellisen tulo- ja poisto IV-järjestelmän asentaminen koneellisen poisto IV-järjestelmän tilalle
- Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen

Mikäli tutkitun kohteen lämmitys toteutettaisiin ilma-vesilämpöpumpulla, tavoite-energiankulusta kannattaisi lähteä pienentämään kustannusoptimaalista tasoa paremmaksi lisäämällä ensin aurinkosähkön tuotantoa, asentamalla aikaisempaa energiatohokkaammat ikkunat ja lisäämällä yläpohjan lämmöneristystasoa. Vastaavasti kaukolämmityssä kohteessa kannattaisi ensin lisätä aurinkolämmöntuotantoa sekä parantaa yläpohjan lämmöneristystasoa ja vasta sitten lisätä aurinkosähkön tuotantoa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Sankelo, P., Jokisalo, J., Nyman, J., Vinha, J. & Sirén, K., 2018. **Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate**. International Journal of Sustainable Energy.

Jokisalo, J., Sankelo, P., Sirén, K. & Vinha, J., 2017. **Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa**. Rakennusfysiikka 2017 seminaari.

Vanhempi tutkija Juha Jokisalo (juha.jokisalo@aalto.fi)

Kuntien oman energiantuotannon keskittäminen kannattaa vain poikkeustapauksissa

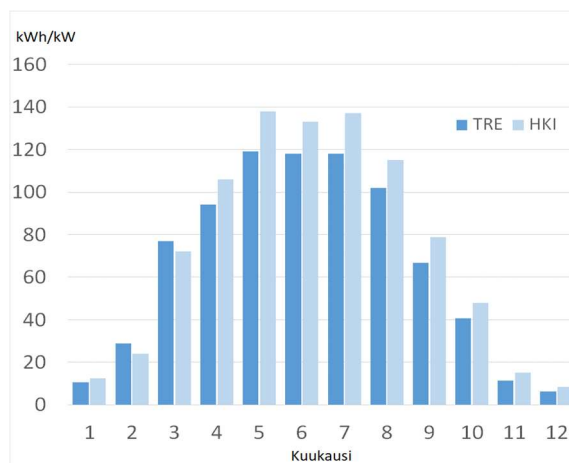
Korvamerkityn keskitetyn tuulienergian hyödyntäminen osana rakennusten omaa energiantuotantoa olisi edullinen tapa toteuttaa omaa uusiutuvaa tuotantoa.

Kansallista lainsäädäntöä (2018) olisi suotavaa kehittää sellaiseen suuntaan, että systeemitason tehokkuus toteutuisi nykyistä paremmin.

Tausta ja tavoitteet

Paikallisen energiantuotannon tuomat mahdollisuudet kuluttajille ovat 2010-luvulta lähtien saaneet merkittävää huomiota sekä mediassa, alan teollisuudessa, että tieteellisessä yhteisössä. Paikallisella tuotannolla voidaan saavuttaa lukuisia etuja ja säästöjä, mutta sen onnistunut hyödyntäminen vaatii huolellista taustatyötä. Paikallista tuotantoa rajoittavat niin säädökset kuin monet toteutusympäristön seikat. Lisäksi laajemman energiajärjestelmän näkökulmasta pienimuotoinen paikallistuotanto ei ole läheskään aina tehokkain tai edullisin tapa toteuttaa tuotantoa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kriittisesti paikallisen sähköntuotannon käytäntöjä ja säädöksiä sekä vertailla paikallisen tuotannon ja etäämpänä keskitetysti tuotetun oman tuotannon mielekkyyttä loppukäyttäjän ja energiajärjestelmän näkökulmasta. Tutkimuksessa rajoitetaan yleisten periaatteiden ja käytänteiden analyysiin paneutumatta syvälle yksittäisten kohteiden erityiskysymyksiin ja niistä nouseviin teemoihin. Toteutetussa analyysissä pääpaino on teknistaloudellisissa kysymyksissä ja siinä tarkastellaan erityisesti energiantuotantoa Tampereella sekä Helsingissä. Tutkimuksessa on lisäksi pyritty tunnistamaan säädöksiin liittyviä mahdollisia kehitystarpeita. Toisaalta toteutetun analyysin kattavuutta rajoittaa se, ettei keskitetyn ja hajautetun tuotannon kustannuvaikutuksia sähkön siirto- ja jakeluverkolle ole analysoitu kattavasti.



Kuva 1. Aurinkoenergian kuukausittainen tuotanto Helsingissä ja Tampereella (kWh/kW_p)

Säädösten ja ilmaston osalta tutkimuksessa toteutetun analyysin lähtökohtana käytetään vuoden 2018 alun tilannetta. Niistä poiketen työssä tarkastellaan kuitenkin mahdollisuutta korvata omaa uusiutuvan energian tuotantoa etätuotannolla. Sähkön verkkosiiroissa sovelletaan normaaleja verotus- ja siirtomaksukäytäntöjä. Esimerkiksi pienimuotoisen paikallisen tuotannon verovapaus tuottaa paikallISRatkaisuille merkittävän taloudellisen hyödyn.

Tulokset ja johtopäätökset

Analyysi osoittaa, että sähkön tuottamisen kiinteistökohtaisilla aurinkopaneeleilla voi saada kannattavaksi. Tällöin on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että paneelien kattoasennus saattaa olla epäedullisempaa kuin asennus muualle kiinteistön alueelle. Esimerkiksi paneelien ylimääräinen kuumeneminen katolle asennettuna saattaa aiheuttaa vuositasolla jopa 3%

tuotantotehokkuuden aleneman. Toisaalta tuotantokustannuksissa ei helposti päästä niin alas, että tuotetun sähkön siirtäminen siirtoverkon kautta eri kiinteistöjen välillä olisi loppukäyttäjälle kannattavaa. Niinpä paneelien mitoitus käyttökohteen mukaan tulisi olla suurenkin asiakkaan ensisijainen tavoite. Taulukossa 1 on havainnollistettu omaan käyttöön hankittujen aurinkopaneelien kannattavuutta sekä käytetyn sisäisen korkokannan ja oman käytön osuuden vaikutusta siihen.

Taulukko 1. Aurinkoenergian tasoitettu tuotantokustannus (€/MWh) omaan käyttöön hankitulle 100kW paneelille, kun hyödynnettyä saadaan 80-100% tuotannosta.

	Tampere* (omaan käyttöön 100% / 80%)	Helsinki* (omaan käyttöön 100% / 80%)
PV _{100kW} (sis. korko 5%)	80,70 / 93,20	72,10 / 81,60
PV _{100kW} (sis. korko 3%)	65,30 / 73,90	58,10 / 64,30
Ostohinta (SPOT+siirto yms.)	83,00	85,10
Tuotantoajankohdalla painotettu ostohinta	82,30	85,50

*Hinnat taulukossa €/MWh

Vertaileva analyysi osoitti, että paikallisen tuotannon ja etäämpänä keskitetysti tuotetun oman tuotannon kannattavuus vaihtelee teknologia- ja sovelluskohtaisesti. Mikäli oman tuotannon sijainti oman kiinteistön ulkopuolella sallitaan, voisi syntyä sekä energijärjestelmän, että loppukäyttäjän näkökulmasta tehokkaampia ratkaisuja. Tällöin esimerkiksi korvamerkityn keskitetyn tuulienergian hyödyntäminen osana rakennusten omaa energiantuotantoa olisi edullinen tapa toteuttaa omaa uusiutuvaa tuotantoa. Keskitetty aurinkoenergiatuotanto ei ainakaan vielä pystyisi vastaavasti kilpailemaan tuulivoiman kanssa. Lisäksi keskitetty aurinkosähkötuotanto voi siirtomaksujen vuoksi olla jopa vähemmän kannattava ratkaisu kuin vastaava oma paikallinen tuotanto.

Kun tarkastellaan energijärjestelmän kokonaistehokkuutta ja -taloudellisuutta, työpaketin analyysi osoittaa, että kansallista lainsäädäntöä (2018) olisi suotavaa kehittää sellaiseen suuntaan, että systeemitason tehokkuus toteutuisi nykyistä paremmin. Erityisesti paikallisuuteen liittyvät uusiutuvan tuotannon rajoitteet ovat systeemin edun vastaisia. Suomessa olisi tyypillisesti systeemin näkökulmasta tehokkaampaa, että erillisiin kiinteistöihin rakennettavien uusiutuvan sähköntuotannon ratkaisujen sijaan vastaavat taloudelliset panostukset keskitettäisiin suuriin tuulivoimalaitoksiin esimerkiksi omistussuhteiden kautta. Tällöin samalla taloudellisella panoksella saataisiin selvästi enemmän uusiutuvaa tuotantoa. Toisaalta, mikäli paikallisella tuotannolla katsotaan olevan muita tavoitteita, kuten esimerkiksi modulaarisemman ja joustavamman energijärjestelmän kokonaisrakenteen edistäminen sekä paikallisen energiatietoisuuden lisääminen, tällöin kokonaisuuden arviointi muuttuu monimutkaisemmaksi ja vaatisi kokonaisvaltaisempaa energijärjestelmän analyysia kuin mikä tässä työpaketissa on toteutettu.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Paatero, J., Jokisalo, J., Vinha, J. **Implementing renewable energy generation for public buildings: the Finnish regulations perspective** (työnimi). *Julkaistaan 2019.*

Tekn. Tri Jukka Paatero (jukka.paatero@aalto.fi)

Uusiutuvan energian etätuotantoon liittyvät yhteiskunnalliset ja juridiset kysymykset

Energiajärjestelmän muutosta mietittäessä keskeisintä on omaksua muutoksen loogiikka; kuluttajat ja kysynnän hillintä keskiössä

Energiaunionia koskevassa strategiassa energiatehokkuuden parantamista nimenomaisesti rakennusallalla kuvataan olennaisimpana osana komission energiastrategian onnistumisessa

Hajautetun etätuotannon roolin korostuminen tulisi ottaa huomioon myös uusiutuvan energian tukijärjestelmiä kehitettäessä.

Tutkimuksen tausta

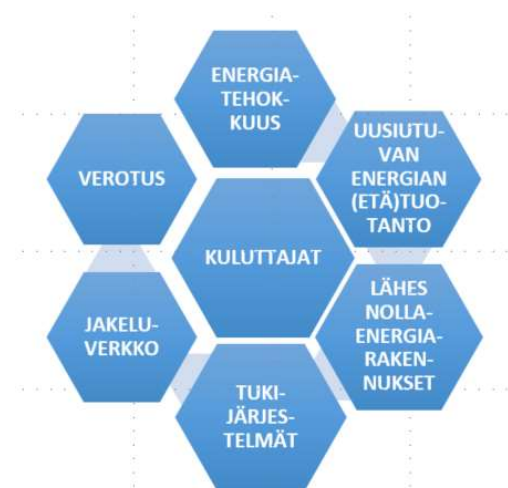
Tutkimuksessa selvitettiin sähkön ja lämmön etätuotannon sääntelyyn liittyviä erityiskysymyksiä. Energiatehokkuussääntelyssä on mukana myös energian, sekä sähkön että lämmön, etätuotantoon liittyvää sääntelyä. Lisäksi lämmön ja sähkön etätuotantoon liittyy moninainen joukko sääntelyinstrumentteja, jotka sääntelevät sähköä ja lämpöä eri tavoin. Sähköenergian sääntely on laajempaa ja yksityiskohtaisempaa kuin lämmön sääntely etenkin markkinasääntelyn kanalta ja erityisesti EU-tason sääntelyssä.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksessa keskityttiin uusiutuvan energian etätuotantoon liittyviin juridisiin ja yhteiskunnallisiin kysymyksiin. Se perustui kirjoitushetkellä voimassa olevaan lainsäädäntöön (02/2016). Tutkimus koostuu yleiskatsauksesta EU:n ja Suomen energiatehokkuussääntelyyn sekä kuvauksista sähkön ja lämmön etätuotantoon liittyvien sääntelyiden erityispiirteistä ja verotuskäytännöistä.

Tutkimuksessa oli tavoitteena kuvata, miten nykyinen sääntely mahdollistaa tai tukee kiinteistön ulkopuolista, uusiutuvaa pientuotantoa ja mitä muutoksia tarvittaisiin, jotta kuluttajien oma pientuotanto olisi nykyistä laajemmin mahdollista toteuttaa. Lisäksi selvitettiin sitä, miten sähköön ja lämpöön liittyvä sääntely eroaa etätuotannon osalta.

Tutkimus tehtiin toimeksiantona ja sen tekijänä oli professori Kim Talus Itä-Suomen yliopistosta.



Kuva 1. Sähkön ja lämmön etätuotantoon kytkeytyvä sääntelykehikko

Tutkimustulokset ja suositukset

Nykyhetken sääntely on nähtävä ainoastaan alkuvaiheena laajemmassa siirtymässä. Tulevaisuudessa sähkön ja lämmön energiatehokkuussääntely on liikkumassa yksityiskohtaisempaan ja pidemmälle menevään sääntelyyn. Tämän tutkimuksen perusteella näyttää siltä, ettei tämän siirtymän laajuutta ja merkitystä ole vielä Suomessa sääntelyn tasolla huomioitu. Tutkimuksessa esitetyt vaihtoehdot ei ole käytetty hyväksi lainsäädännössä. Myöskään meneillään olevat muutokset eivät ole riittäviä. Kun Suomessa nykyiseen sääntelyjärjestelmään tehdään pieniä muutoksia ja tarkennuksia, siirtymä kohti resurssitehokasta järjestelmää vaatii laajoja ja perustavanlaatuisia muutoksia nykyiseen sääntelykokonaisuuteen ja nykysääntelyyn tehtävien pienten korjausten ja muutosten sijasta huomio tulisi kiinnittää koko sääntelyn taustalla vaikuttaviin tavoitteisiin ja logiikkaan ja niihin kohdistuviin muutospainaisiin.

Uusiutuvan sähköenergian keskitetyn pienimuotoisen etätuotannon taloudellisen kannattavuuden kolme keskeistä komponenttia ovat E-luvun soveltamisen taseraja, etätuotannon arvonlisävero-kohtelu sekä valmistevero ja huoltovarmuusmaksu. Lämpöenergian kohdalla taseraja on merkityksellinen. Arvonlisävero-kohtelu, valmistevero ja huoltovarmuusmaksu vaikuttavat suoraan etänä tuotetun uusiutuvan sähköenergian hintaan ja siten kilpailukykyyn suhteessa verkosta ostettavaan sähköön. Mitä enemmän veroluontoisia maksuja sähkön omatuotantoon kohdistetaan, sitä epätodennäköisemmin omatuotantoon investoidaan. Voidaan olettaa, että valtiotalouden kannalta näin menetetään enemmän verotuloja kuin investointeja edistämällä omakäyttösähköön kohdistuvista veroluonteisista maksuista luopumalla.

Lämmön etätuotannon osalta tilanne on erilainen verrattuna sähkön etätuotantoon lähinnä sen vuoksi, että lämmön tuotantoon liittyy merkittävästi vähemmän sääntelyä. On kuitenkin syytä huomioda, että lämmöntuotantoon liittyvää sääntelyä ollaan valmistelemassa Euroopan komission toimesta, tosin sen tarkemmasta sisällöstä on kuitenkin vaikea sanoa vielä mitään varmaa.

Sähköenergian etätuotannon hyödyntämiseen tontinrajojen vaikuttaa myös sähköverkkotoimintaa sääntelevä lainsäädäntö. Lämpöverkkoja ei vastaavalla tavalla säädellä.

Uusiutuvien energiamuotojen etätuotannon nykyistä parempi edistäminen edellyttää valtioneuvostotason ohjausta seuraavissa asioissa:

- EU lainsäädännön joustoelementtien hyödyntäminen E-luvun käsitteen kansallisessa määrittelyssä, esimerkiksi Hollannin esimerkin soveltaminen taserajan määrittelyssä
- Arvonlisäverotuksen järkevä soveltaminen EU lainsäädännön puitteissa siten, että alle 10.000 euron vuotuinen sähkön (ja lämmön) omakäyttö keskitetystä uusiutuvan energian etätuotantoyksiköstä on mahdollista
- Sähköverolain muuttaminen siten, että nykyinen sähköverosta vapautettu mikro- ja pientuotanto laajennetaan koskemaan myös yleisen verkon yli omaan käyttöön siirrettyä sähköenergiaa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Kim Talus, Sirja-Leena Penttinen & Mikko Kantero (2016) **Uusiutuvan energian etätuotantoon liittyvät yhteiskunnalliset ja juridiset kysymykset**. Raportti. 50 s.

Pirkko Harsia (pirkko.harsia@tuni.fi)



Nykyaikaiset rakennusautomaatiojärjestelmät tarjoavat hyvät mahdollisuudet olosuhteiden hallintaan

Pyrittäessä entistä parempaan energiatehokkuuteen taloteknisten järjestelmien tulee mukautua käyttöasteessa tapahtuviin muutoksiin ja sisäilmaolosuhteiden hallintaan entistä pienemmissä kokonaisuuksissa.

Käytetyt automaatiojärjestelmät mahdollistavat tarpeenmukaisuuden ja seurannan lisäämisen, mutta lähtökohta tarpeenmukaisen ohjauksen lisäämiselle on valaistus-, ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien suunnitteleminen siten, että olosuhteiden säätäminen pienissäkin kokonaisuuksissa onnistuu.

Tutkimuksen tausta

Rakennuksen energiatehokkuuden parantamisen kannalta rakennusautomaatiojärjestelmien rooli tulee korostumaan ennen kaikkea tarpeenmukaisissa säädöissä ja rakennuksen toimivuutta varmistavissa mittauksissa. Pyrittäessä entistä parempaan energiatehokkuuteen taloteknisten järjestelmien tulee mukautua käyttöasteessa tapahtuviin muutoksiin ja sisäilmaolosuhteiden hallintaan entistä pienemmissä kokonaisuuksissa. Tällä tarkoitetaan energian käytön optimointia siten, että rakennuksen käyttöaikana luodaan tavoitellut olosuhteet käytössä oleviin tiloihin, tarpeen mukaisella määrällä energiaa. Osana COMBI-hanketta tarkasteltiin uusien pirkkanmaalaisten palvelurakennusten rakennusautomaatiojärjestelmien tasoa. Vertailukohtana tarkastelussa käytettiin standardissa SFS-EN 15232 esitettyä tasoluokitusta. Standardi käsittelee automaation vaikutusta rakennuksen energiatehokkuuteen ja esittää neliportaisen tasoluokituksen automaatiojärjestelmille, joka on esitetty kuvassa 1.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tavoitteena tarkastelussa oli muodostaa kuva Tampereen seudun kuntien 2010-luvun palvelurakennuksissa toteutettujen automaatiojärjestelmien tasosta ja tämän perusteella määritellä automaation roolia osana energiatehokasta rakentamista ja antaa suosituksia järjestelmien kehittämiselle. Tarkasteltavat kohteet olivat koulu- ja päiväkotirakennuksia. Standardissa on esitetty myös menetelmä laskea automaation vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. Luokitukseen liittyvien ongelmakohtien vuoksi tarkastelussa ei laskettu varsinaisia energiankulutusvaikutuksia, vaan standardin luokituksia (kuva 1) käytettiin vain vertailukohtana automaatiotasoon määrittämiseksi. Luokitukseen liittyviä ongelmakohtia on käsitelty tarkemmin ST ohjeisto 20:ssä.

Tutkimusta tehtiin pääasiassa kohteiden teknisten dokumenttien avulla. Teknisistä dokumenteista saadun tiedon perusteella rakennuksille määriteltiin rakennusautomaatiojärjestelmän tasoluokka. Dokumenttien avulla tarkasteltiin minkälaisia rakennuksiin rakennetut automaatiojärjestelmät ovat rakenteeltaan ja mitä toimintoja automaation avulla hallitaan.

Hyvä energiatehokkuus



Huono energiatehokkuus

Luokkia vastaavat automaatiotasot

- Luokka A:** talotekniikan hallintajärjestelmä
- Luokka B:** rakennuksen automaatiojärjestelmä
- Luokka C:** automaattiset säätö- ja ohjaustoiminnot
- Luokka D:** manuaalinen käyttö

Kuva 1. Standardissa määritelty tasoluokitus. (Ympäristöministeriö, 2012. Rakennusten automaation vaikutus energiatehokkuuteen)

Tutkimustulokset ja suositukset

Tarkastelluissa kohteissa rakennusautomaatiojärjestelmien taso on hyvä. Rakennuksissa käytetyt järjestelmät ovat nykyaikaisia keskitettyjä rakennusautomaatiojärjestelmiä. Suurin osa taloteknisten järjestelmien ohjauksista ja säädöistä on liitettyä keskitettyyn automaatiojärjestelmään. Valvomoratkaisuna rakennuksissa on käytetty selainpohjaista käyttöliittymää, jolloin erillistä valvomotietokonetta ei tarvita.

Lattialämmityksen säädöissä käytetään huonemittauksia, mutta säätimet eivät ole yhteydessä keskitettyyn automaatiojärjestelmään. Tällöin huonemittauksista saatava tieto huonelämpötiloista ei välity valvomoon eikä siitä ole mahdollista kerätä historiatietoa. Rakennushankkeessa tulisikin määritellä, että lattialämmityksen säätimet on valittava siten, että ne voidaan liittää osaksi keskitettyä automaatiojärjestelmää, jolloin myös niiden toimintaa voidaan valvoa valvomosta.

Käyttämällä huonesäätimiä, voidaan tarpeenmukaisuutta lisätä käyttämällä nykyistä enemmän ilmavirtasäätöjä. Hyvin suunniteltuna ja toteutettuna ilmavirtasäätöjen avulla voidaan myös valvoa ilmavirtoja ja havaita ongelmia esimerkiksi kanaviston tasapainotuksessa. Ilmavirtasäätöjä käytettäessä tulee kiinnittää huomiota, että säätimet on määritelty liitettäväksi keskitettyyn automaatiojärjestelmään ja niiltä saadaan takaisinkytkentänä tieto säätöpeltien läpi virtaavasta ilmavirrasta. Huonesäätimiä käytettäessä on suositeltavaa myös perinteisten patteritermostaattien korvaaminen huonesäätimiltä ohjattavilla sähköisillä toimilaitteilla.

Yksittäinen rakennusautomaatiojärjestelmien tarkastelussa esiin noussut kysymys on, hyödynetäänkö toteutettavien automaatiojärjestelmien tarjoamia mahdollisuuksia riittävästi tarpeenmukaiseen ohjaukseen sekä olosuhteiden ja energiankulutuksen seurantaan? Käytetyt automaatiojärjestelmät mahdollistavat tarpeenmukaisuuden ja seurannan lisäämisen, mutta lähtökohta tarpeenmukaisen ohjauksen lisäämiselle on valaistus-, ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmien suunnitteleminen siten, että olosuhteiden säätäminen pienissäkin kokonaisuuksissa onnistuu. Konkreettisenä ehdotuksena on keskitettyyn rakennusautomaatiojärjestelmään liitettävien huonesäätimien käytön lisääminen myös koulu- ja päiväkotirakennuksissa siten, että samalla saavutetaan riittävän kattava mittausjärjestelmä rakennuksen olosuhteiden valvontaan.

Teollinen internet (IoT) tekee tuloaan myös talotekniikkaan ja on odotettavissa, että tulevaisuudessa rakennuksista saatavan tiedon käsittelyyn ja jalostamiseen tullaan kehittämään entistä enemmän palveluita. Esimerkiksi automaattiseen vikadiagnostiikkaan ja energiankäytön analysointiin on jo palveluita saatavilla. Teollinen internet mahdollistaa myös mallipohjaisten ennustavien säätöjen kehittämisen. Tulevaisuuden palveluiden hyödyntäminen edellyttää kattavaa tiedon keräämistä rakennuksista. Vaikka tarkastelluissa kohteissa on nykyaikaiset ja kattavat rakennusautomaatiojärjestelmät valvomoineen, ei toteutuneiden olosuhteiden ja energiankulutuksen valvomiseksi ole juurikaan liitetty mittauksia automaatiojärjestelmiin.

lisätietoja ja yhteydenotot

Mikkola, Sami., 2016. **Automaation vaikutus energiatehokkuuteen Pirkanmaan palvelurakennuksissa.** Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604204673>

Lehtori Sakari Uusitalo (sakari.uusitalo@tuni.fi)

Verhojen ja kaihtimien vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen, CASE palvelutalo

Kokonaisenergiankulutuksen optimoimiseksi ei ikkunoihin kannataisi välttämättä asentaa sälekaihtimia tai sisäpuolisia verhoja.

Verhot tai kaihtimet tarvitaan häikäisyuojauksen vuoksi, mutta koska niiden käyttö julkisissa rakennuksissa on puutteellista, on automatisointi järkevää.

Luonnonvalon merkitys ihmisen hyvinvoinnille on merkittävä.

Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja lähtökohdat

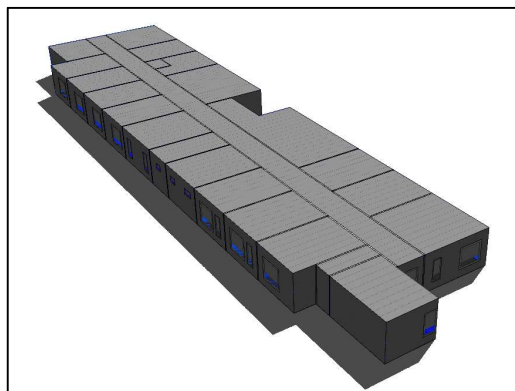
Auringonsäteilyllä on oleellinen vaikutus rakennuksen valaistus-, lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukseen. Lisäksi luonnonvalon merkitys ihmisen hyvinvoinnille on merkittävä. Varsinkin rakennuksissa, joissa oleskellaan pitkiä aikoja sisätiloissa, tulisi luonnonvalon hyödyntämistä korostaa.

Auringonsäteilyn hyödyntämiseen ja aurinkosuojauksiin vaikuttaa suunnitteluvaiheessa pääasiassa arkkitehti. Tässä tulokortissa tarkastellaan auringonsäteilyn vaikutuksia palvelutalon lämmitys- jäähdytys- ja valaistusenergiaan, kun käytetään suojaamattomia tai jollain tavalla aurinkosuojattuja ikkunoita.

Auringonsäteilyn vaikutusta palvelutalon lämmitys- jäähdytys- ja valaistusenergiaan tarkasteltiin IDA-ICE-olosuhdesimulointiohjelmalla yhdessä mallikohteessa. Tarkasteltu rakennus on työpaketin WP2-tutkimuksissa käytetty palvelutalon tyyppimalli I (kuva 1).

Dynaamiset olosuhdesimuloinnit ja -laskelmat tehtiin Helsingin säätiedoilla ja rakentamismääräyskoelma D3-2012:n arvoilla seuraavin poikkeuksin ja lisämäärittelyin:

- valaistuksen teho on 7 W/m² (rakentamismääräyskoelma 14 W/m²)
- käyttöprofiili valaistukselle: päällä joka päivä klo 6-8 ja 15-23 käyttöasteella 1.0 (rakentamismääräyskoelmassa päällä 24/7 käyttöasteella 0.3). Automatisoitu ohjaus lisää käyttöaika-
taulun ajankohtiin vakiovalo-ohjauksen 0-300 luksia. Tämä tarkoittaa, että kun luonnonvalon määrä tilan työpisteelle on yli 300 luksia, on valaisimet sammutettu, ja kun luonnonvalon määrä on 0 luksia, on valaisimet täydellä teholla. Luonnonvalon määrän ollessa välillä 0-300 luksia säädetään valaisimien tehoa lineaarisesti 100-0 %.
- aurinkosuojauksina tarkasteltiin nykyään tyypillisesti käytettyjä ikkunan väliin asennettuja sälekaihtimia (kulma 45°) ja uusissa kohteissa suosituttuja sisäpuolisia, vaaleita puoliläpäiseviä verhoja (screen). Aurinkosuojaus on aikaohjauksessa suljettu klo 21-06 ja muulloin auki. Säteilyohjaus lisää käyttöaika-taulun ohjauksen, jossa aurinkosuoja suljetaan päivä-
aikaan, jos ikkunan ulkopintaan tuleva säteily ylittää 100 W/m². Säteilyteho 100 W/m² on arvo, jolloin tutkimuksien perusteella aletaan tyypillisesti kokea häikäisyä.



tyyppimalli I.

Tutkimustulokset ja suositukset

Taulukossa 1 on esitetty tutkimuksessa mallinnetut aurinkosuojaus- ja vakiovalovariaatiot mallinnustuloksineen. Tuloksina on esitetty valaistuksen, tilalämmityksen ja tilajäähdytyksen vuositteinen energiankulutus kohteessa neliömetriä kohden (kWh/m² a). Mallinnustulosten pienimmät kokonaisenergiankulutukset on esitetty taulukossa vihreällä ja suurin punaisella.

Taulukko 1. IDA-ICE-simulointien aurinkosuojaus- ja vakiovalo-ohjausvariaatiot tuloksineen (kWh/m² a)

	suojautyyppi	valaistuksen ohjaus	aurinkosuojiin ohjaus	tilalämmitys kWh/m ²	jäähdytys kWh/m ²	valaistus kWh/m ²	edelliset yhteensä kWh/m ²
1	ei	aikataulu	-	185,1	0,9	25,6	211,6
2	ei	vakiovalo 0-300 lux	-	187,9	0,6	20,7	209,2
3	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu	suljettu	194,0	0,3	25,6	219,9
4	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu	aikataulu	185,1	0,8	25,6	211,5
5	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu	aikataulu + säteily	192	0,3	25,7	218
6	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	suljettu	194,5	0,3	24,9	219,7
7	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	aikataulu	187,9	0,6	20,9	209,4
8	sälekaihtimet uloimpien lasien välissä	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	aikataulu + säteily	193,6	0,3	23,5	217,4
9	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu	suljettu	187,8	0,6	25,6	214
10	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu	aikataulu	184,8	0,8	25,6	211,2
11	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu	aikataulu + säteily	187,5	0,6	25,6	213,7
12	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	suljettu	190,5	0,4	21,5	212,4
13	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	aikataulu	187,6	0,6	20,7	208,9
14	sisäpuolinen puoliläpäisevä verho	aikataulu + vakiovalo 0-300 lux	aikataulu + säteily	190,6	0,4	20,9	211,9

Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että ne perustuvat edellä mainittuihin ohjaustapoihin yhdessä mallikohteessa. Tämän CASE-mallinnuksen tuloksista voidaan kuitenkin havaita, että tässä kohteessa tarkastelluilla aurinkosuojuuksilla on pieni vaikutus kokonaisenergiankulutukseen (lämmitys- jäähdytys- ja valaistusenergia), sillä eroa suurimman ja pienimmän energiankulutuksen välillä on noin 5 %.

Oleellinen havainto tutkimuksesta on, että suurin energiankulutus muodostuu tilanteessa, jossa on läpi vuoden suljetut sälekaihtimet (45° kulmassa) ja kello-ohjattu valaistus. Lähes yhtä suuri kulutus tulee kohteessa, jossa on läpi vuoden suljetut sälekaihtimet (45° kulmassa) ja vakiovalo-ohjattu valaistus. Edellä mainittu tilanne, sälekaihtimet suljettuina (45° kulmassa), on valitettavan tuttu näky julkisissa rakennuksissa.

Pienin kokonaisenergiankulutus saavutetaan kohteessa, jossa on aikatauluohjatut screen-verhot ja vakiovalo-ohjaus. Lähes yhtä pieni energiankulutus tulee kuitenkin tilanteessa, jossa on vakiovalo-ohjattu valaistus eikä lainkaan aurinkosuojuuksia. Hyvinvoinnin ja kokonaisenergiankulutuksen optimoimiseksi ei siis ikkunoissa oleville sälekaihtimille tai verhoille olisi tässä tutkimuskohteessa välttämättä tarvetta.

Ikkunoiden suojausta kohteessa puoltaa käyttäjämukavuuden kannalta vaadittava häikäisysojaus auringon paistaessa matalalta. Tällöin aikatauluohjatut screen-verhot ja vakiovalo-ohjaus ovat energiatehokkain vaihtoehto ja ne ovat myös käyttäjien hyvinvoinnin kannalta mielekkäimmät, koska ne estävät häikäisyn ja mahdollistavat jatkuvan näkyvyyden ulos.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Lehtori Kari Kallioharju (kari.kallioharju@tuni.fi)

Energiatehokas valaistus valo-olosuhteen laatua unohtamatta

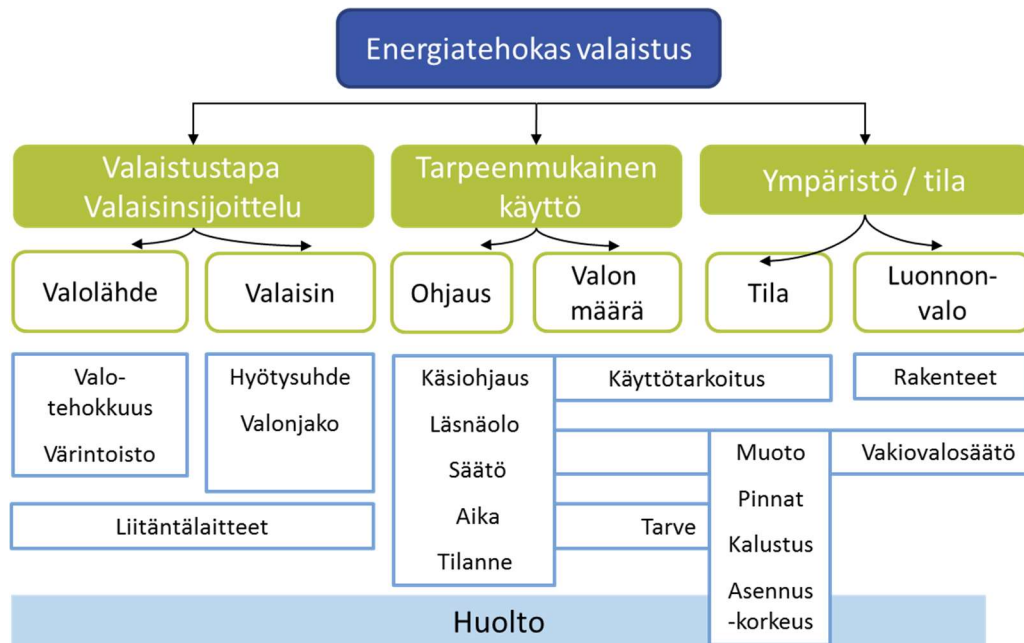
Työpaikakohtaisen valaistuksen käyttäminen on aina energiatehokkainta.

Valaistuksen energiatehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi ohjauksilla.

Valaistusvoimakkuuksien standardinmukainen suunnittelu on tärkeää.

Tutkimuksen tausta

Valo on yksi tärkeimmistä sisäolosuhteista, koska se mahdollistaa näkemisen. Valolla on myös suuri merkitys ihmisen vireystilaan, mielialaan ja hyvinvointiin. Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat suunnitteluvaiheessa pääasiassa arkkitehti ja valaistussuunnittelija. Tässä tulokortissa pysäytetään valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavissa teknisissä ratkaisuissa. Automaattisten aurinkosuojausten ja sitä kautta luonnonvalon vaikutusta valaistus-, jäähdytys- ja lämmitysenergiaan käsitellään tulokortissa ”Verhojen ja kaihtimien vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen, CASE palvelutalo”.



Kuvan lähde: Kallioharju & Harsia (2015) Valaistuksen laadullisten tekijöiden ja energialaskennan määrittely FinZEB-hankkeelle.

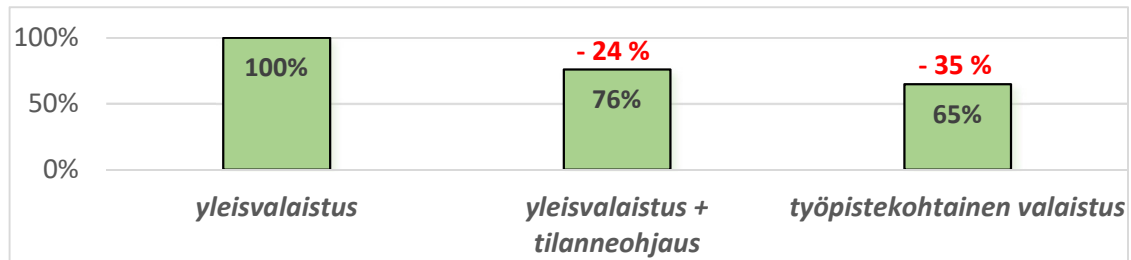
Kuva 1. Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.

Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tulokortin tavoitteena on esitellä valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja merkittävimmät energiatehokkuuteen vaikuttavat ongelmakohdat nykyisissä valaistus-ratkaisuissa. Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät on esitelty kuvassa 1. Karkeasti jaoteltuna valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät ovat valaisimet ja niiden sijoittelu, valaistuksen ohjaus ja rakennuksen arkkitehtuuri.

Tutkimuksen lähtökohdat, tutkimustulokset ja suositukset

Uusissa palvelurakennuksissa käytetään pääsääntöisesti energiatehokkaita valaisimia. Valaisimien sijoittelussa rakennuksessa ja tiloissa on kuitenkin paljon parannettavaa, joten sen merkitystä tutkittiin tarkemmin. Lisäksi tarkasteltiin valaistuksenohjauksen vaikutusta energiankulutukseen, sillä ohjaustekniikat ovat uusissa palvelurakennuksissa pääsääntöisesti kehittyneitä, mutta niiden käyttö ei välttämättä ole optimaalista. Valaisinsijoittelun osalta valaistusstandardi SFS-EN 12464-1:2011 ”Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus” määrittelee, että palvelurakennuksissa tulisi käyttää työpistekohtaista valaistusta, mutta perinteiset suunnittelukäytänteet johtavat kohteissa yleisvalaistuksen suunnitteluun. Valaistustutkimusten yhtenä osana mallinnettiin standardinmukaisen työpistekohtaisen valaistuksen ja perinteisen yleisvalaistuksen energiankulutuksen eroja (kuva 2).



Kuva 2. Suhteellinen vuosittaisen valaistusenergian muutos palvelutalojen asuin- ja oleskelutiloissa, kun yleisvalaistukseen lisätään tilanneohjaus tai työpistekohtainen valaistus.

Tuloksista voidaan havaita, että palvelutaloissa yleisvalaistuksen suunnittelu on energiatehottomin ratkaisu, mutta energiatehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi tilanneohjauksilla. Työpistekohtaisen valaistuksen käyttäminen olisi kuitenkin energiatehokkainta. Valaistus tulisi suunnitella myös entistä tarkemmin pohjautuen tilojen todellisiin käyttötarkoituksiin, väriytykseen ja pintamateriaaleihin, sillä puutteellisilla lähtötiedoilla valaistus usein ali- tai ylimitoitetaan ja se vaikuttaa valaistuksen laatuun ja energiankulutukseen. Tutkimuksen perusteella valaistusstandardissa määriteltyjen eri työtehtävien luksitasojen (kuva 3) arvoista poikkeaminen portaalla ylöspäin kasvattaa tilan valaistuksen sähkötehoa n. 50 % ja alaspäin pienentää n. 33 %.

”SFS-EN 12464-1:2011 TYÖKOHTAIDEN VALAISTUS” Valaistusstandardin luksitasot työpisteille:
20-30-50-75-100-150-200-300-500-750-1000-1500-2000-3000-5000

Kuva 3. Standardin SFS 12464-1:2011 suositeltavat valaistusvoimakkuudet työpisteille.

Valaistuksen manuaalisten tilanneohjausten merkitys korostuu jo edellä esitetyissä tutkimustuloksissa (kuva 2), mutta valaistuksessa voidaan säästää myös automatisoitujen ohjausmenetelmien avulla. Mallinuksissa palvelutalojen valaistusenergiasta voitiin säästää läsnäolo-ohjauksin noin 15 % ja läsnäolo + päivänvalo-ohjauksella noin 25 % verrattuna perinteiseen käsiohjaukseen. Vaikka kohteeseen siis suunniteltaisiin työpistekohtaisen valaistuksen sijaan yleisvalaistus, on ohjaustekniikoiden tilakohtainen hyödyntäminen tärkeää määritellä ja toteuttaa huolellisesti. Päivänvalo-ohjausta hyödynnettäessä ja valon laatua ja kokonaisenergiatehokkuutta ajatellen myös automaattisen aurinkosuojauksen hyödyntämistä kohteessa tulisi harkita (ks. tulokortti. ”Verhojen ja kaihtimien vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen, CASE palvelutalo”).

Lisätietoja ja yhteydenotot

Aaltonen, J-P., 2017. **Valaistuksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät: Valaistuksen mallintaminen COMBI-hankkeessa.** Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa:

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705168395>

Lehtori Kari Kallioharju (kari.kallioharju@tuni.fi)



Sisäilmaongelmaisen koulun korjausvaihtoehtojen ja purkamisen vertailu – Case-tutkimus

Mikrobivaurioituneen rakennuksen korjausvaihtoehtoja voi määritellä, arvioida ja vertailla toiminnallisuuden, taloudellisuuden ja teknisten seikkojen perusteella.

Lopullisessa päätöksenteossa toiminnallisuus ja pehmeät arvot jäävät keskeisiksi korjaus- tai purkupäätöksen perusteluiksi, koska tekniset ja taloudelliset erot vaihtoehtojen välillä näyttävät jäävän melko pieniksi.

Tutkimuksen tausta

Koulujen sisäilmaongelmat ja niiden korjaaminen on herättänyt viime aikoina paljon keskustelua. Rakennusten korjausvaihtoehtojen ja purun vertailu ja arviointi on monitahoista ja hankalaa. Tässä case-tutkimuksessa selvitetään menetelmiä mikrobivaurioituneen julkisen rakennuksen korjausvaihtoehtojen ja purkuvaihtoehdon arviointiin ja vertailuun. Tutkimuksen case-kohteena on Pirkanmaalla sijaitseva nelikerroksinen lukiorakennus. Koulu on valmistunut kahdessa vaiheessa: vuosina 1958 ja 1967. Kuntaan rakennetaan uusi lukiorakennus uuteen paikkaan ja kunta tarvitsisi kolmannen yläkoulun kahden käytössä olevan yläkoulun lisäksi. Nykyinen rakennus voisi korjattuna toimia yläkouluna tai rakennus voitaisiin purkaa ja tilalle voitaisiin rakentaa kokonaan uusi yläkoulu. Mahdollista olisi myös nykyisen rakennuksen osittainen purku ja uuden osan rakentaminen.

Case-tutkimuksessa kohteesta on tehty kokonaisvaltainen tarkastelu, jossa on huomioitu toiminnalliset, tekniset ja taloudelliset seikat mikrobikysymysten lisäksi. Koulun korjausvaihtoehdot on tutkimuksessa jaettu kolmeen luokkaan: kevyt korjaus, keskiraskas korjaus ja raskas korjaus. Lisäksi vaihtoehtona on vanhan rakennuksen purkaminen ja uuden koulurakennuksen rakentaminen vanhan paikalle. Myös osittaista purkua ja siihen liittyvää uudisrakentamista voidaan harkita, mikäli rakennuksen tietyillä osilla nähdään korkeaa arkkitehtonista arvoa.

Case-kohteesta on tehty kuntoarvioita ja sisäilmaselvitys ja koulussa on ollut sisäilmahaittoja erityisesti tietyissä luokissa. Sisäilmaselvityksen mukaan merkittävimmät syyt sisäilmahaittoille ovat ulkoseinärakenteiden vauriot ja puutteelliset tiivistykset sekä alapohjarakenteen tiiviyn puutteet. Epätiiviyden johdosta rakenteissa olevat epäpuhtaudet kulkeutuvat huonetiloihin sisäilman ollessa alipaineinen ulkoilmaan nähden.

Tutkimustulokset ja suositukset

Mikrobivaurioituneen rakennuksen korjausvaihtoehtoja voi määritellä, arvioida ja vertailla toiminnallisuuden, taloudellisuuden ja teknisten seikkojen perusteella. Kuntotutkimuksilla on suuri merkitys rakennuksen korjausastetta ja teknistä käyttöikää arvioitaessa. Tässä tutkimuksessa korjausaste määriteltiin asteikolla kevyt, keskiraskas ja raskas korjaus. Korjausasteen perusteella rakennukselle saadaan eripituisia käyttöikäjä. Kevyt korjaus ei olisi taloudellisesti ja toiminnallisesti perusteltua, koska tarvittavat tilamuutokset nostavat kustannukset melko korkealle. Korkeahkot korjauskustannukset taas johtavat siihen, että käyttöikä rakennuksella pitäisi olla pitkälle tulevaisuuteen. Pitkä käyttöikä voidaan varmistaa ainoastaan vähintään keskiraskaalla korjauksella. Toisaalta, mikäli rakennuksen käyttötarve olisi vain muutama vuosi, voidaan vertailla kevyen korjauksen kustannuksia väistötilojen käytöstä ja mahdollisista uusista kalusteista aiheutuviin kustannuksiin. Keskiraskaan korjauksen käyttöikäksi

arvioidaan selvästi yli 20 vuotta ja sitä voisi edelleen uusilla korjauksilla jatkaa. Raskas korjaus on kustannuksiltaan hyvin lähellä uudisrakennuksen tasoa, joten uudisrakennusvaihtoehto antaa myös raskaaseen korjausvaihtoehtoon lähes kaikki tarkastelutiedot.

Taloudellisessa tarkastelussa korjausinvestoinnin keskeinen muuttuja on korjausaste ja elinkaarikustannuksissa käyttöikä. Uudisrakennuksen ja korjatun rakennuksen investointikustannukset sekä hoito-, kunnossapito- ja energiakustannuksia on laskettu TAKU-ohjelman avulla. Case-kohteessa selvitystyön tuloksena keskiraskaan korjauksen korjausasteeksi muodostui 80 % eli korjauskustannus oli 80 % vastaavan kokoisen uuden rakennuksen kustannuksista. Kuitenkin elinkaarikustannuksia vertaamalla keksiraskas korjaus on hieman kalliimpi vaihtoehto kuin rakennuksen purkaminen ja uuden koulun rakentaminen.

Kustannusvertailu. Keskiraskaasti korjatun rakennuksen ja uudisrakennuksen ylläpitokustannukset.

	Ylläpitokustannukset			
	€/ vuosi		€/kk	
	Keskiraskas korjaus	Uudisrak.	Keskiraskas korjaus	Uudisrak.
Siivous	99568	92991	8297	7749
Isännöinti	16043	16482	1337	1374
Hoito ja huolto	49894	43375	4158	3615
Vuosikorjaus	41587	39155	3466	3263
Muut	8800	8900	733	742
Kiinteistövero	68500	68500	5708	5708
Vesi	11975	6585	998	549
Sähkö	34739	33191	2895	2766
Lämmitys	36977	21407	3000	1850
Sisäinen pääomavuokra	489840	519000	40820	43250
Yhteensä	857923	849586	71412	70865

Lopullisessa päätöksenteossa toiminnallisuus ja pehmeät arvot jäävät keskeisiksi korjaus- tai purkupäätöksen perusteluiksi, koska tekniset ja taloudelliset erot vaihtoehtojen välillä näyttävät jäävän melko pieniksi (Vuosikustannuksissa noin 1% ero). Voidaan olettaa, että toiminnallisuus olisi uudisrakennuksessa korjausvaihtoehtoja parempi, mutta vanhan koulurakennuksen kulttuuriarvo ja kuntalaisten tunteet varmaankin puoltavat säilyttämistä ja korjaamista. Lisäksi päätöksenteossa on otettava huomioon sisäilmaoireilun jatkumisen riski. Ennen päätöksentekoa tarvitaan siten vielä perusteellinen kuntotutkimus kohteesta.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Projektitutkija Ulrika Uotila (ulrika.uotila@tuni.fi)

Olli Teriö

Malin Moisio

Tero Marttila

Paavo Kero



Energiakortilla jämakkyttä hankkeen ohjaukseen

Energiakorttiin kirjataan numeeriset tavoitteet energiatehokkuuden ja sisäilman laadun avainluville. Energiakortissa esitetään keskeiset numeeriset tavoiteluvut, joiden laskentaperusteet ovat tarkoituksenmukaiset ja yksiselitteiset.

Rakennuksen käyttöönoton jälkeen energiakortin avulla voidaan todentaa hankkeen tavoitteiden saavuttamisen aste.

Tutkimuksen tausta

Rakennushankkeissa on tunnetusti kaksi kipupistettä, jotka ovat tilaajan tavoitteiden selkeä esittäminen ja hankkeen käyttöönottovaiheessa rakennuksen käytön aloittaminen tilaajan tavoitteiden mukaisesti. Kun tilaajan tavoitteet esitetään numeerisesti, niin voidaan olettaa, että tavoitteet ovat myös selkeitä. Muitakin selkeitä esitystapoja on olemassa, mutta energiakortissa rajaudutaan oleellisimpiin mitattaviin energiatehokkuuden tavoitteisiin. Käyttöönoton jälkeen energiakorttia voidaan hyödyntää tavoitteiden saavuttamisen arvioinnissa. Onko tilaaja saanut sitä, mitä on tilannut. Energiakortti yhdistettynä toimivuustarkastukseen vastaa myös kysymykseen, käytetäänkö rakennusta energiatehokkaasti. Vastaus saadaan systemaattisella tehotarkastelulla.

Tutkimustulokset ja suositukset

Energiakortin tarkoituksena on selkeyttää rakennushankkeen tavoiteasetantaa energiatehokkuuden ja hyvän sisäilman aikaan saamiseksi. Korttiin kirjataan numeeriset tavoitteet energiatehokkuuden ja sisäilman laadun avainluville. Osa numeerisista tavoitteista syntyy rakennushankkeeseen ryhtyvän päätöksistä ja osa suunnittelun yhteydessä laadittavista laskelmista, jotka rakennuttajan tulee kuitenkin tarkistaa ja hyväksyä. Kortti otetaan käyttöön rakennuttajan toimesta hankesuunnitteluvaiheessa ja sitä täydennetään päätösten ja suunnittelun etenemisen myötä. Rakennuksen käyttöönoton jälkeen kortissa esitetyt tavoitteet todennetaan esimerkiksi TAPRE-periaatteiden mukaisessa toimivuustarkastuksessa.

Energiakortissa esitetään kohteen perustietojen lisäksi lämmityksen, jäähdytyksen, ilmanvaihdon ja sähkönkäytön tavoitteet tarkoituksenmukaisesti eriteltynä sekä lämpökuormat. Toimivuustarkastelua varten kortin laadinnassa käytetty taulukkolaskentaohjelma laskee tavoitteista tarkasteluhetken säätilaa vastaavat tehotiedot, jolloin tarkastelussa saadaan välittömästi käsitys rakennuksen energiatehokkuudesta. Lisäksi kortissa esitetään tunnuslukuja, joilla mahdollisten poikkeamien syitä voidaan alustavasti arvioida.

Energiakortin vahvuuksia ovat yksiselitteiset numeeriset tavoiteluvut, joiden laskentaperusteet esitetään taulukkolaskentaohjelman solujen kommenttikentissä. Kun laskentaperiaatteet ja käytettävät yksiköt ovat vakioituja, saadaan yksittäisten hankkeiden suunnittelulle selkeät lähtökohdat. Ajan myötä tiedon kumuloituessa voidaan vertailta myös hankkeiden välillä energiatehokkuuden ja sisäilman laadun toteutumia.

Energiakortin sisällön määrä on pyritty pitämään mahdollisimman vähäisenä, mutta kuitenkin ohjaavana. Suurin hyöty kortin käytöstä saadaan, kun kortin jaottelut otetaan huomioon sähkönjakelun ryhmittelyssä, sähkön ja energian mittaroinnissa sekä taloautomaatiosta saatavan trendiseurannan jäsentämisessä ja hälytysten suunnittelussa. Kiinteistöjen energiamittauksen suunnittelussa energiakortin jaottelua voidaan pitää minimiä.

Energiakortti. Taulukossa on esitetty energiakortin alkuosa. Taulukossa näkyvien osa-alueiden lisäksi kortissa esitetään yhteenveto ja toimivuustarkastuksen avainlukuja sekä tunnuslukuja rakennusten välisiin vertailuihin.

Combi energiakortti - toimivuuden tarkastelu ver.2.1 - Luonnos 16.8.2016

Perustiedot	Kohde	5 ryhmän päiväkotia, Tampere		
	Rakennustyyppi	Päiväkotia		
	Tilavuus (RH1-lomake)	6450	m ³	
	Rakennuksen kokonaisala	1603	m ²	
	Lämmin nettoala A _{netto}	1456	m ²	
	Sisäilmaluokka	52		
Lämmitys ja ilmanvaihto		Suunniteltu	Toteutunut	Yksikkö
	Ilmanvaihto, poistoilmamäärä	3,7	3,5	m ³ /s
	Ilmanvaihto, erillispoistojen ilmamäärä		0,8	m ³ /s
	Lämmitysteho, ilmanvaihto	28,3	42,9	kW
	Vaipan ominaislämpöhäviö kerroin	0,416	0,416	kW/K
	Vaipan lämmön kulutus	8,2	8,9	kW
	Vaippa + Ilmanvaihto	36,6	51,7	kW
	Lämmin käyttövesi		6	kW
Sähkön käyttö	Ilmanvaihtokoneiden sähköteho	5	5	kW
	Erillispoistojen sähköteho	1	1	kW
	Lämmönkehitys ja lämmönjakelu (kiertovesipumput yms)	1	1	kW
	Valaistus (suunniteltu = max)	15,17	11,4	kW
	Keittiökoneet ja muut tuotantolaitteet	5	5	kW
	Jäähdytys			
	Pohjateho kW			kW
	Sähkö yhteensä	27,2	23,4	kW
Lämpökuormat	Lämpökuorma ihmisistä	9	6	kW
	Kiinteistöenergia	3	4,8	kW
	Valaistus	10,6	8,0	kW
	Auringon säteily ikkunoista		0	kW
	Säkölaitteet			kW
	Ilmaenergia yhteensä	22,6	18,8	kW
Yhteenveto	Laskennallinen ostoenergian teho	41,1	56,3	kW
	Kaukolämpö - teho mitattu (tuntikesiarvo)		30	kW
	Sähkö - teho mitattu (tuntikesiarvo)		30	kW
	Mitattu teho yhteensä	41,1	60	kW
Toimivuuden tarkastelu	Toimivuuden tarkastelu PVM	25.2.2016		
	Ulkolämpötila	1,2	1,2	°C
	Sisälämpötila, lämmityskausi	21	22,5	°C
	Lämpötilaero suunniteltu	19,8	21,3	°C
	Henkilömäärä	120	80	
	Lämpökuorma ihmiset	9	6	kW
	Valaistuksen käyttöaste %	100	75	%
	Ilmatiivieysluku		0,34	
	LTO hyötysuhde	70	55,0	%
Tunnusluvut	Tunnusluvut	Suunniteltu	Toteutunut	Tot / Suun %
	Energian hankinta W/m2	28,2	41,2	146 %
	Kokonaisilmanvaihto l/hlö/s	30,8	43,4	141 %
	IV-kerroin	2,1	1,9	94 %
	Vaipan lämpöhäviö	8,2	8,9	108 %
	Lämpökuorma / lämmitystarve	62 %	36 %	59 %
	Ilmanvaihto / lämmön nettopinta-ala [l/s/m2]	2,5	2,4	94 %
	Tilatehokkuus (Hyötysuhde)	12,1	18,2	150 %

Lisätietoja ja yhteydenotot

Projektipäällikkö Olli Teriö (2017 asti)

Projektipäällikkö Juhani Heljo (juhani.heljo@tuni.fi)

Projektitutkija Ulrika Uotila (ulrika.uotila@tuni.fi)



TaTe-toimivuustarkastelu ja toimivuustarkastuskortti

Ainoastaan toimiviksi saatetuilta, todennetuilta ja toimivina pidetyiltä ratkaisuilta voidaan odottaa energiatehokkuutta koko rakennuksen elinkaaren aikana.

Toimivuustarkastuksia kannattaa tehdä määrävälein.

Arvosanallisen viestintätyövälineen= toimivuustarkastuskortin avulla saadaan nykyistä ymmärrettävämmiin viestitettyä tietoa käyttäjille, päättäjille ja tekniselle väelle rakennuksen todellisesta toimivuudesta.

Tutkimuksen tausta

Toimivuustarkastelulla tarkoitetaan vastaanoton ja takuutarkastusten jälkeisiä toimia. Toimivuustarkastuksessa katselmoidaan ja todennetaan, että sisäolosuhteet ovat suunnitelmien, ja alkuperäisten tavoitteiden mukaiset, talotekniikan toiminta vastaa rakennuksen tilojen todellista käyttöä sekä rakennus on käytön ja huollon kannalta toimiva ja rakennusta käytetään ja huolletaan oikein. Reaaliset edellytykset todentamisen tekemiselle ja dokumentoinnille on kerrottava ja määriteltävä jo hanke- ja toteutussuunnitteluvaiheen asiakirjoissa.

Ainoastaan toimiviksi saatetuilta, todennetuilta ja toimivina pidetyiltä ratkaisuilta voidaan odottaa energiatehokkuutta koko rakennuksen elinkaaren aikana.

Kiinteistöhenkilökunnan itse tekemässä tai ulkoa ostetussa määrävälein tehdyssä toimivuustarkastuksessa katselmoidaan kohde, tehdään tarpeen ja sopimusten mukaan käyttäjäkysely, käyttäjähaastatteluja, erilaisia mittauksia ja seurantadatan analysointia. Haastatteluissa ja kartoituksissa tulee esiin usein myös rakennus- ja tilankäyttöpuutteita.

COMBI-hankeessa tehdyissä palvelurakennusten selvityksissä nousi esiin monenlaisia talotekniikkaan liittyviä toimivuuspuutteita. Esimerkiksi toimimaton automatiikkaohjaus on saatettu muuttaa käsikäytölle. Tuli tarve selvittää, mitä nykyisessä hankeprosessissa pitää edelleen kehittää, jotta henkilöt käyttäjistä päättäjiin pystyisivät ja motivoituisivat osallistumaan toimivan, energiatehokkaan ja turvallisen rakennuksen aikaansaamiseksi ja ylläpitämiseksi.

Varsinkin julkisissa rakennuksissa on haasteellista tuottaa ja välittää juuri sellaista tietoa, joka motivoi niin tilojen loppukäyttäjiä, tilojen huoltohenkilöstöä kuin kuntapäättäjiäkin ponnistelemaan rinta rinnan yhdessä energiatehokkaisiin ja turvallisiin toimintatapoihin. Seurannan ja arvioinnin yksinkertaiset työkalut ovat tarpeen tiedonkulun varmistamiseksi.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Toimivuusselvitysten kohdekiinteistöinä toimi viisi pirkanmaalaista palvelurakennusta, joissa tarkasteltiin, mitattiin ja havainnoitiin kaikkia taloteknisiä järjestelmiä ja osassa myös siivottavuutta. Tarkastuskierroksilla oli mukana myös kiinteistöjen huoltohenkilöstöä. Useimmista kiinteistöistä oli käytössä teknisiä dokumentteja ja seurantatietoa. Tärkeänä osana kokonaiskuvan muodostumisessa olivat myös tehdyt haastattelut ja kyselyt.

Tutkimustulokset ja suositukset

Toimivuustarkastelujen laajuus ja sisältö kannattaa tilaajan harkita tapauskohtaisesti esim. siten kuin TAPRE-hankkeen yhteydessä 2014 jo esitettiin neljään eri asteeseen luokiteltuna (energiatarkastelu, sisäympäristön laatutarkastelu, käytettävyyden ja huollettavuuden tarkastelu sekä laajennettu toimivuustarkastelu).

Toimivuustarkastuksia kannattaa tehdä määrävälein (esim. 3 vuoden välein) ja kun alkuvaiheessa, takuutarkastusten jälkeen, on tehty laaja tarkastus, voidaan myöhemmin tai aika ajoin tehdä kohdennetumpi tarkastus.

Katselmoinnissa kertyneistä tiedoista ja ehdotuksista kannattaa laatia yksiselitteiset dokumentit selvine parannus- ja korjausehdotuksineen sekä korjausaikatauluineen. Tekninen henkilökunta tarvitsee tehdystä selvitystyöstä teknisen selostuksen perusteluineen.

Ei-ammattilaisille päättäjille ja käyttäjille laaditaan lisäksi arviointiasteikolla varustettu yksinkertainen nykykokonaiskuvan kertova em. selvitysraporttiin linkittyvä viestintäasiakirja = toimivuustarkastuskortti: Tämä on tilanne nyt – osa hyvin ja osa ei! Korttiin kirjataan toimivuustarkastuksessa tarkastetut keskeiset asiat esim. väittämämuodossa ja arvioija ilmaisee asteikolla 1-5, kuinka hyvin väittämä pitää paikkansa. Varsinkin niille käyttäjille ja päättäjille, jotka eivät ole rakentamisan ammattilaisia, ammattitaitoisen arvioijan antama arvosana kertoo oleellisesti enemmän kuin esim. pelkästään jonkin puutteen kirjaus.

Toimivuustarkastuskortin (kuva 1) avulla saadaan nykyistä ymmärrettävämmiin viestitettyä tietoa käyttäjille, päättäjille ja tekniselle väelle rakennuksen todellisesta toimivuudesta. Kortista jo nopealla silmäyksellä pystytään näkemään, mitkä osa-alueet ovat nyt hyvässä kunnossa ja missä on kehittämistarvetta.

Kohdekiinteistö:	Arvioija, Yritys/hlö:					Pvm:
	täysin eri mieltä				täysin samaa mieltä	
Väittämät eri osapuolille ja toimivuustarkastuksista tehty arvio	1	2	3	4	5	Tarketietoa ja muistion kohta
KÄYTTÄJIEN HAASTATTELU						
Käyttäjät ovat tyytyväisiä tilojen olosuhteisiin				X		
Käyttäjät ovat tyytyväisiä kiinteistöhoidon tasoon					X	
Käyttäjät on perehdytetty talotekniikan käyttöön				X		
Käyttäjät on perehdytetty energiatehokkaaseen käyttötapaan					X	
Tiedonkulkua huoltomiehen ja käyttäjien välillä toimii hyvin					X	
Käyttäjät pystyvät ja vaikuttavat tilojen lämpötilaan					X	
Käyttäjät pystyvät ja vaikuttavat tilojen ilmanvaihtoon			X			
Olosuhteiden tavoitearvot ovat tiedossa	X					
HUOLTOHENKILÖKUNNAN HAASTATTELU						
Huoltohenkilökunnan perehdytys on onnistunut	X					
Huoltohenkilökunnan kokemus ja koulutus on riittävä			X			
Huoltohenkilökunnalle on varattu riittävästi aikaa kohteissa					X	
Huoltohenkilökunta tarttuu korjaustarpeisiin nopeasti					X	
Tehdyt laitteistojen ym. huollot kirjataan ylös	X					
Olosuhteiden tavoitearvot ovat tiedossa	X					
SIIVOUKSENKILÖKUNNAN HAASTATTELU						
Siivoushenkilökunnan perehdytys on onnistunut				X		
Siivoushenkilökunnan kokemus ja koulutus on riittävä				X		
Siivoushenkilökunnalle on varattu riittävästi aikaa kohteissa					X	

Kuva 1. Esimerkki ja osakopio toimivuustarkastuskortista.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Virta, Suvi, 2016. **Talotekniikan toimivuus viidessä COMBI-hankkeen case-kohteessa**. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201605036029>

TAPRE-ohje 07: **Rakennuksen (talotekniikan) toimivuustarkastelu**, 30.06.2014. Saatavissa: http://www.tampere.fi/tilakeskus/material/uusikansio/9jA2b76cA/Ohje_07_Toimivuustarkastelu.pdf

Lehtori Pirkko Pihlajamaa (pirkko.pihlajamaa@tuni.fi)



Olosuhdemittauksilla todennetaan tavoitteiden saavuttaminen

Olosuhteiden mittaamisesta hyötyvät sekä rakennuksen omistaja, että käyttäjä.

Rakennushankkeen alkuvaiheessa tulisi kiinnittää aiempaa enemmän huomiota tavoitteiden selkeälle määrittelylle.

Riittävän kattavalla olosuhteiden mittaamisella mahdollistetaan energiatehokkuustoitien vaikutusten tarkkaileminen ja olosuhteiden pysyvyyden varmistaminen.

Tutkimuksen tausta

Olosuhteita mitataan rakennuksissa koko ajan entistä enemmän ja mahdollisuudet mittausten käyttämiseen taloteknisten järjestelmien ohjauksessa ja säätämisessä ovat parantuneet huomattavasti. Olosuhteiden mittaamisesta hyötyvät sekä rakennuksen omistaja, että käyttäjä. Olosuhteiden mittaamisen avulla voidaan tehostaa ja optimoida talotekniikan järjestelmien käyttämää energiaa. Mittausten avulla voidaan tarkkailla olosuhteiden pysyvyyttä ja järjestelmien säädöt voidaan toteuttaa tarpeenmukaisesti. Esimerkiksi kuvasta 1 nähdään, että mittaamalla luokkatilan hiilidioksidipitoisuutta ja lämpötilaa voidaan arvioida tilan käyttöastetta. On kuitenkin tarpeen lisätä rakennusalan ymmärrystä olosuhdemittauksista ja niiden tuomista mahdollisuuksista sekä kehittää olosuhdemittauksille rakennushankkeessa asetettavien tavoitteiden määrittelyosaamista.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksessa tarkasteltiin CASE-kohteiksi valittujen kuuden kiinteistön olosuhdemittauksia. Tarkastelussa keskityttiin sellaisiin olosuhdemittauksiin, jotka oli liitetty kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmään. Tavoitteena oli lisätä rakennushankkeen tilaajan ja suunnittelijan tietämystä olosuhdemittauksista ja niiden mahdollisuuksista sekä niille asetettavien tavoitteiden määrittelystä hankkeen alkuvaiheessa. Konkreettisena tavoitteena oli laatia työkalu olosuhdemittauksille asetettavien tavoitteiden määrittämiseksi.

Tutkimusaineistona käytettiin case-kohteiden taloteknisiä suunnitelmia, joista selvitettiin olosuhdemittausten nykytilanne case-kohteissa. Erityistä huomiota suunnitelmissa kiinnitettiin rakennusautomaation säätökaavioihin, joista selviää eri mittaukset sekä mihin ja miten niitä on tarkoitus hyödyntää. Tutkimuksessa haastateltiin myös ylläpidosta vastaavia henkilöitä. Heiltä saadun CASE-kohteiden mitausdatan avulla tarkasteltiin mahdollisuuksia hyödyntää mittauksia järjestelmien toiminnan analysointiin ja järjestelmien toiminnan perusteella laadittiin ohjeistus ja työkalu yksilöimistä varten.



ohjauksiin. Tarkasteluiden
Kuva 1. Luokkatilasta mitaamalla hiilidioksidipitoisuutta mittaamalla nähdään selvästi
mitaustarpeiden määrittämistä ja
koska tila on ollut käytössä.

Tutkimustulokset ja suositukset

Tutkimuksessa tarkastelluissa suunnitteluohjeissa asetettavat tavoitteet olivat pääsääntöisesti hyviä, mutta kohteiden suunnitelmissa oli havaittavissa puutteita tavoitteiden määrittelemisessä. Ohjeista oli havaittavissa myös, että sisäolosuhteita käsiteltäessä valaistuksen merkitys olosuhteisiin on unohdettu tai sitä on käsitelty vain vähäisesti. Mittauksille asetetuissa ohjeistuksissa jätetään liiallista tulkinnan varaa suunnittelijalle, jolloin voi olla riskinä, että tilaajan tavoitteita olosuhteiden seurannalle ei ymmärretä oikein tai ne jätetään huomioon ottamatta suunnittelussa. Rakennushankkeen alkuvaiheessa tulisikin kiinnittää aiempaa enemmän huomiota tavoitteiden selkeälle määrittelylle, jolloin kaikille hankkeen osapuolille olisi selkeä ja yhdenmukainen käsitys siitä, missä laajuudessa olosuhteita on tarkoitus seurata kiinteistön käytövaiheessa.

TOTEUTETTAVAT OLOSUHDEMITTAUKSET TULEVASSA RAKENNUSHANKKEESSA

Tämän dokumentin tavoitteena on edistää olosuhdemittausten määrittämistä ja hyödyntämistä hankesuunnitteluvaiheessa. Alla on esitetty mahdollisia mitattavia olosuhteita ja mihin niitä voidaan hyödyntää. Tilaaja ja suunnittelija keskustelevalle yhdessä mitattavista rakennuksen tulisi toteuttaa ja rastiittavat "mittaus toteutetaan"-kohtaan toteutettavat mittaukset. HUOM-kenttään voidaan antaa tarkennuksia mittaukseen liittyen, esim. mittaus toteutetaan 50 %:iin kyseisistä tiloista.

Mitattava olosuhde	Hyödynnettävyys	Mittaus toteutetaan	HUOM
Lämpötila			
TE Tuulikaapit	oviverhokojien ohjaus, HUOM liitettävä rakennusautomaatioon		
TE Märkätilat	lattiaämmityksen tms. ohjaus		
TE Luokka-, lepo- ja leikkihuoneet, huoneistot	Käyttäjäläpäläutteen ja oikeiden lämpöolosuhteiden todentaminen, lämmityksen ohjaus, toissijainen IMS ohjaus		
TE Ruokailutilat ja salit	Käyttäjäläpäläutteen ja oikeiden lämpöolosuhteiden todentaminen, lämmityksen ohjaus, toissijainen IMS ohjaus		
TE Eteiset ja aulat	Käyttäjäläpäläutteen ja oikeiden lämpöolosuhteiden todentaminen, lämmityksen ohjaus, toissijainen IMS ohjaus		
TE Käytävät	Käyttäjäläpäläutteen ja oikeiden lämpöolosuhteiden todentaminen, lämmityksen ohjaus, toissijainen IMS ohjaus		
TE Rakenteet	Rakenteiden lämpöolosuhteiden todentaminen ja nopea reagointi		
Hiilidioksidi			

Kuva 2. Osana tutkimusta laadittiin työkalu helpottamaan olosuhteiden mittaamiselle asetettavia tavoitteita. Työkalu on saatavana COMBI-hankkeen materiaalipankista.

Tehtäessä olosuhdemittaukset entistä näkyvämmiksi myös kiinteistön käyttäjille tulee olosuhteisiin kiinnitettyä aiempaa enemmän huomiota. Tämän tyyppisessä näkyväksi tekemisessä tulee ottaa huomioon seurannan käyttöliittymä. Kiinteistön maallikkokäyttäjille käyttöliittymän tulee olla selkeä ja ymmärrettävä. On myös tarkasti mietittävä käyttäjien mahdollisuutta vaikuttaa olosuhteita ohjaavien järjestelmien asetusarvoihin. Etenkin huonesäätöjen huoneyksiköiden käyttö ja niiden mahdollisuudet ja rajoitukset tulee esittää käyttäjille mahdollisimman ymmärrettävästi.

Nykyisistä rakennuksista ei aina saada riittävän tarkasti tietoa minkälaiset olosuhteet kiinteistöllä saavutetaan verrattuna käytettyyn energiaan. Energiatehokkuuden optimoinnilla on väistämättä jonkinlaisia vaikutuksia myös sisäolosuhteisiin. Riittävän kattavalla olosuhteiden mittauksella ja seurannalla mahdollistetaan näiden vaikutusten tarkkaileminen ja sen varmistaminen, että olosuhteet pysyvät tavoiteltuina. Rakennusten energiankulutusta tarkastellaan usein pintaalaan verrannollisena. Mittaamalla olosuhteita voidaan kehittää myös muunlaisia mittareita energiatehokkuuden määrittämiseen.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Vaskikallio, Svante, 2017. **Rakennusten sisäolosuhteiden mittaaminen ja näkyväksi tekeminen.** Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705107320>
Lehtori Sakari Uusitalo (sakari.uusitalo@tamk.fi)



Järkevä sähkötehon ja -energian mittausta lisää ylläpidon tehokkuutta

Järkevän energiankäytön kannalta on tärkeää tunnistaa suurimmat kulutusryhmät.

Entistä yksityiskohtaisemman seurannan avulla voidaan puuttua mahdollisiin poikkeamiin sekä ongelmakohtiin kulutuksessa.

Hankesuunnitelman energiaselvityksessä tulisi ottaa kantaa, mitkä ovat rakennuksen merkittävimmät laite- ja kulutusryhmät tehon- ja energiankulutuksen kannalta.

Tutkimuksen tausta

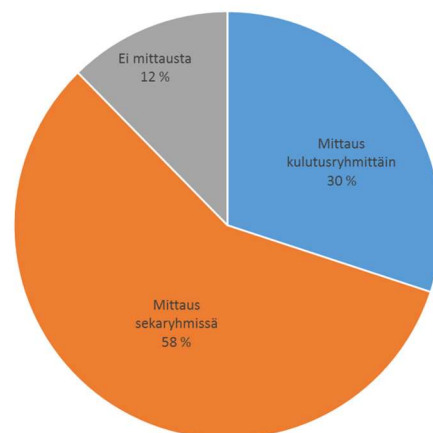
Uusien rakennusten energiatehokkuuden lisääntyminen ei ole näkynyt rakennusten pienentyneenä sähköenergian kulutuksena. Monesti uusissa rakennuksissa sähköä käyttävät järjestelmät ovat lisääntyneet ja sitä kautta kulutus saattaa olla jopa suurempaa kuin vanhemmissa rakennuksissa.

Laite- ja kulutusryhmäkohtaisen seurannan avulla saadaan yksityiskohtaista tietoa energiankulutuksen tasosta. Yksityiskohtaisen seurannan avulla voidaan puuttua mahdollisiin poikkeamiin sekä ongelmakohtiin kulutuksessa. Jotta mahdolliset poikkeamat ja ongelmat voidaan havaita ja määrittellä tarkasti, tulee seurannan olla vähintään tuntitasoista. Näin pystytään tarkasti määrittämään, millä ajanjaksolla poikkeamia esiintyy ja millaisia ne ovat kestoaltaan.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksen perustaksi laadittiin selvitys siitä, miten kohteiden sähköenergianseurannat on toteutettu, mitä laite- ja kulutusryhmiä seurataan sekä mitkä ovat tämän tyyppisten palvelurakennusten suurimmat kulutusryhmät. Kuvassa 1 on esitetty erään CASE-kohteen osalta, kuinka hyvin mittauksen perusteella voidaan jakaa kulutusta eri järjestelmäkokonaisuuksiin. Kuvasta nähdään, että sähköryhmiä on mitattu kattavasti, mutta niiden avulla on vaikea jakaa kulutusta järjestelmäkokonaisuuksiin, koska saman mittauksen takana on erityyppisiä kuormia.

Tutkimuksessa tarkasteltiin viittä olemassa olevaa koulu ja/tai päiväkotikohdetta Pirkanmaalla. Tutkimuksen tavoitteena oli laatia esimerkkiratkaisuja, kuinka olemassa olevien rakennusten sähköenergianmittausjärjestelmiä voitaisiin parantaa järjestelmäkohtaisemman seurannan näkökulmasta. Nykytilanteen selvittämisen ja esimerkkiratkaisujen pohjalta laadittiin työkalu, jonka avulla rakennuttajan ja suunnittelijoiden on mahdollista selkeyttää sähkön mittaamiselle asettavia tavoitteita.



Kuva 1. Tutkimuksessa tarkasteltiin, kuinka hyvin nykyisten mittauksen avulla saadaan selville järjestelmäkohtaiset kulutusjakaumat.

SÄHKÖENERGIAN KULUTUKSEN SEURANNALLE ASETETUT TAVOITTEET JA TARPEET					Kohde:			
					Kohteen tiedot:			
					Laatija(t):			
S1	S2	S3	S4					S5
LAITE- JA KULUTUSRYHMÄ	LAITE- JA KULUTUSRYHMIEN SISÄLTÖ	LAITE-/KULUTUSRYHMÄ KOHTAINEN SEURANTA	YHDISTETTY LAITE- JA KULUTUSRYHMIEN SEURANNAT					EI MITTAUSTA
		Mittaus 1:	Mittaus 2: Kulutus-/laiteryhmien nimet }	Mittaus 3:	Mittaus 4:	Mittaus 5:	Mittaus 6:	

Kuva 2. Osana tutkimusta laadittiin työkalu helpottamaan sähkönenergian mittaamiselle asetettavia tavoitteita. Työkalu on saatavana COMBI-hankkeen materiaalipankista.

Tutkimusta tehtiin pääasiassa kohteiden teknisten dokumenttien avulla. Teknisistä dokumenteista saadun tiedon pohjalta luotiin vaihtoehtoiset ratkaisumallit sähkönenergianseurantojen toteutukselle. Ratkaisumallien tarkoituksena on luoda kuva siitä, miten tämän tyyppisissä palvelurakennuksissa sähkönenergian mittaukset ja seurannat voitaisiin toteuttaa tehokkaasti. Lisäksi annetaan uusia näkökulmia palvelurakennusten, sekä muiden rakennustyyppien sähkönenergian seurannan suunnitteluun ja toteutukseen.

Tutkimustulokset ja suositukset

Hankesuunnitelman energiaselvityksessä tulisi ottaa kantaa, mitkä ovat rakennuksen merkittävimmät laite- ja kulutusryhmät tehon- ja energiankulutuksen kannalta. Energiaselvitykseen tulisi määrittää ne laite- ja kulutusryhmät, joista seurannat halutaan toteuttaa sekä mahdolliset varaukset seurannoille. Lisäksi suunnittelun alkuvaiheessa tulisi sähkökeskusten tilavarauksiin kiinnittää erityistä huomiota. Sähkökeskusten järkevällä sijoittelulla pystytään minimoimaan seurantojen aiheuttamat lisäkustannukset.

Sähköteknisistä dokumenteista seurannat tulisi huomioida etenkin keskuskaaviossa, sähkötyöselostuksessa ja järjestelmäkaaviossa. Dokumenteista tulee käydä ilmi mittauskohtaisesti, mitä laite- ja kulutusryhmää mittarilla seurataan, mihin valvonta-alakeskukseen mittarit liitetään sekä virtamuuntajien muuntosuhde ja tarkkuusluokka. Automaatiosuunnitelmissa seurantojen tulee näkyä vähintään säätökaaviossa, johon tehdään kokonaan oma osio seurannoille. Säätökaaviossa tulee esittää seuraavat asiat: mittareiden väyläliitännät, mittarikohtaisesti mitattavat suureet, pätö- ja loiseenergian yhteenlaskenta, energiankulutusten esittäminen valvomossa laite- ja kulutusryhmittäin sekä mittausten perusteella suoritettavat ohjelmalliset hälytykset ja hälytysluokat. Lisäksi mittareiden ja valvonta-alakeskuksen välisistä liitynnöistä tulee tehdä periaatekaavio.

Tavoitteen asettelussa ja suunnittelussa on huomioitava mittausten tekeminen näkyväksi. Selkeä ja helposti tulkittava käyttöliittymä lisää merkittävästi mittausten hyödyntämismahdollisuuksia kiinteistön ylläpidossa.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Jalli, Jarkko, 2017. **Sähkönenergian kulutusseuranta Pirkanmaan palvelurakennuksissa**. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705199108>

Lehtori Sakari Uusitalo (sakari.uusitalo@tamk.fi)

Lämpöenergian kulutusta kannattaa seurata nykyistä tarkemmin

Havainnoimalla muutoksia energian kulutuksessa voidaan paikallistaa järjestelmissä ja rakenteissa esiintyviä vikoja, sekä löytää mahdollisesti energiaa tuhlaavia kulutuskohteita.

Yksittäinen, virheellisesti toimiva energiankuluttaja voi olla pidemmän aikavälin tarkastelussa suuri kustannustekijä.

Riittävän tarkka lämmitysenergian kulutusseuranta mahdollistaa asetettujen tavoitteiden täyttymisen todentamisen.

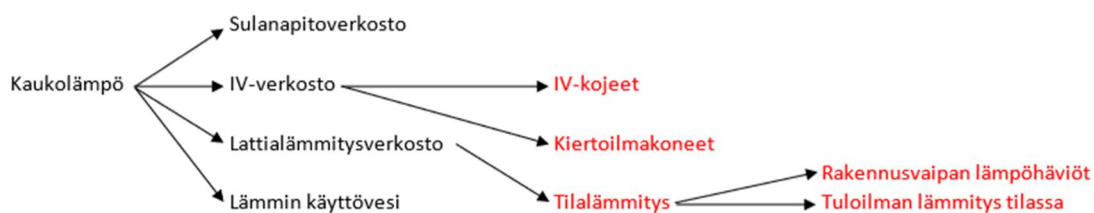
Tutkimuksen tausta

Havainnoimalla muutoksia energian kulutuksessa voidaan paikallistaa järjestelmissä ja rakenteissa esiintyviä vikoja, sekä löytää mahdollisesti energiaa tuhlaavia kulutuskohteita. Riittävän tarkka kulutuseuranta mahdollistaa myös tavoitteiden asettamisen energiankulutukselle. Kiinteistössä ja sen järjestelmissä käytetään tänä päivänä paljon erilaisia mittauksia prosessien ohjaamiseen. Näitä mittauksia voitaisiin hyödyntää entistä tehokkaammin myös kiinteistön lämpöenergiankulutuksen ja lämpöenergiataseen seurannassa. On tärkeää tuoda esiin lämpöenergian aiempaa tarkemmasta seurannasta saatavia etuja sekä mahdollisuuksia toteuttaa seurantaa. Näin rakennushankkeen tilaaja ja suunnittelijat pystyvät asettamaan selkeät tavoitteet mittaamiselle ja seurannalle.

Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksen tavoitteena oli tuoda esiin mahdollisuuksia hyödyntää olemassa olevia mittauksia kiinteistön lämpöenergiataseen muodostamisessa. Tavoitteena oli luoda esimerkkejä kuinka lämpöenergian nykyistä tarkempi seuranta kiinteistöllä olisi mahdollista toteuttaa. Lisäksi tarkoituksena oli luoda työkalu, jonka avulla tilaaja ja suunnittelija voivat asettaa selkeät tavoitteet lämpöenergian mittaamisen toteutukselle rakennuksessa.

Tutkimus tehtiin pääasiassa kohteiden teknisten dokumenttien perusteella. Valituista CASE-kohteista tarkasteltiin olemassa olevia lämpöenergia- sekä vesimittareita sekä muita mittauksia, jotka voivat olla hyödyksi lämpöenergiataseen selvittämisessä. Tämän perusteella laadittiin parannusehdotuksia tarkemman kulutusjakauman muodostamiseksi. Tutkimuksessa arvioitiin myös mahdollisten energiamittausten lisäämisen ja muiden parannusehdotusten kustannusvaikutuksia. Lisäksi esiteltiin yleisesti mahdollisuuksia toteuttaa lämpöenergian mittauksia ja hyödyntää muita olemassa olevia mittauksia.



mustalla = olemassa olevat seurannat

punaisella = nykyisen mittaroinnin mahdollistamat laskennalliset seurannat

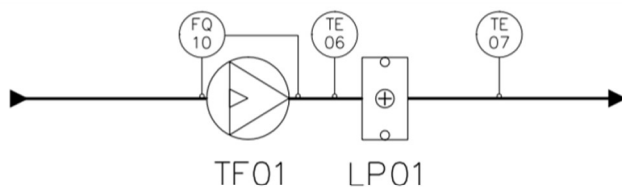
Kuva 1. Olemassa olevan kiinteistön olemassa olevat lämpöenergiamittaukset ja mahdollisuudet tarkentaa mittauksia laskennallisilla menetelmillä.

Tutkimustulokset ja suositukset

Tutkimuksessa havaittiin, että kaikissa tarkastelluissa CASE-kohteissa olemassa olevia mittauksia voidaan hyödyntää tarkemman kulutusjakauman muodostamiseksi. Eri lämmitysverkostojen kuten patteriverkoston, IV-verkoston ja lattialämmitysverkoston lämmitysenergian kulutusta seurattiin erikseen kolmessa viidestä kiinteistössä. Näistä kahdessa oli eroteltu myös lämpimän käyttöveden kulutusseuranta. Yhdessä kohteessa oli eroteltu myös ilmanvaihtokoneiden lämmitysenergian seuranta. Ilmanvaihtokoneiden laskennallinen lämpöenergian kulutusseuranta olisi mahdollista toteuttaa olemassa olevia mittauksia hyödyntäen kaikissa tarkastelluissa kohteissa. Lämpimän käyttöveden osalta laskennallinen kulutusseuranta olisi mahdollista toteuttaa neljässä kohteessa viidestä. Uudisrakentamisen näkökulmasta tarkasteltuna parannusehdotusten kustannusvaikutuksen arvioitiin olevan n. 1000€ - 3000€ (alv. 0 %) kohteesta riippuen.

Tarkastelujen perusteella vaikuttaisi, että kiinteistöomistajat ovat kiinnostuneita lämmitysenergian nykyistä tarkemmasta seurannasta esimerkiksi lämmitysverkostojen osalta, mutta vielä tarkempaan erotteluun kuten ilmanvaihtokonekohtaiseen seurantaan ei olla kiinnitetty huomiota. Syitä tähän ei tässä tutkimuksessa kartoitettu.

Yksittäinen, virheellisesti toimiva energiankuluttajakin voi olla pidemmän aikavälin tarkastelussa suuri kustannustekijä. Esimerkiksi väärin asetetuilla käyntiajoilla toimiva ilmanvaihto saattaa vuositasolla aiheuttaa suuren hukkakulutuksen. Riittävän tarkka lämmitysenergian kulutusseuranta mahdollistaa asetettujen tavoitteiden täyttymisen todentamisen. Nykyistä tarkemmalla kulutusseurannalla havaitaan nopeasti kulutuksessa tapahtuvat muutokset. Tämä mahdollistaa esimerkiksi korjaustoimenpiteiden kohdistamisen oikeisiin kohteisiin. Tarkka kulutusseuranta auttaa myös tunnistamaan energian käytön kannalta merkitykselliset kohteet ja todentamaan energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutuksia.



Tuloilmapatterin LP01 lämmitysteho lasketaan lämpötila-antureiden TE06 ja TE07, sekä ilmapvirtamittauksen FQ10 perusteella kaavalla 1. Tehon perusteella lasketaan lämmittimen energiankulutusta kaavalla 2.

Kaava 1. lämmitysteho (kW)

$= 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{ilmapvirta (m}^3/\text{s)} \cdot 1 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)} \cdot (\text{ilman lämpötila patterin jälkeen (}^\circ\text{C)} - \text{ilman lämpötila ennen patteria (}^\circ\text{C)})$

Kaava 2. energiankulutus (kWh)

$= \text{keskimääräinen lämmitysteho (kW)} \cdot \text{käyntiaika (h)}$

Kuva 2. Esimerkki tuloilman lämmitystehon ja energian seurannasta laskennallisesti.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Pekkanen, Matias, 2017. **Lämpöenergia- ja vesimittaukset CASE-kohteissa**. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705127887>

Lisätietoja: Lehtori Sakari Uusitalo (sakari.uusitalo@tuni.fi)



Energiankulutustietojen kerääminen, analysointi ja hyödyntäminen

Järjestelmällisellä ja oikein jäsennellyllä energiankulutusseurannalla voidaan saavuttaa energiatehokkuuden parannuksia.

Olemassa olevaa tekniikkaa ja ohjelmistoa on usein hyödynnettävissä energianseurannan tarpeisiin nykyistä enemmän.

Tausta ja tavoitteet

Olemassa olevan rakennuksen energiatehokkuuden arvioinnissa keskeisessä roolissa on rakennuksen toteutuneen energiankulutuksen analysointi. Analysoinnin perusteella voidaan todeta, käytetäänkö rakennuksessa energiaa tarpeenmukaisesti kyseisen rakennuksen käyttö ja tarpeet huomioiden. Jotta energiankäytön analyysi voidaan tehdä, tulee energiankulutuksesta olla käytettävissä tarkoitukseen sopivalla tavalla jäsenneltyä energiankulutusdataa.

Tässä tulokortissa selvitetään, millainen on energiankulutusdatan keräämisen ja hyödyntämisen käytännöt 2010-luvulla Tampereen seudun kunnissa ja esitetään parannusehdotuksia, miten niitä voisi kehittää.

Tulokset ja johtopäätökset

Energiankulutustietojen keräämisen ja hyödyntämisen toteuttamisessa on haastatteluin laaditun selvityksen mukaan merkittäviä eroja eri kuntien välillä. Kunnissa on tyypillisesti käytössä jonkinlainen energianseurantaohjelmisto, kuten esimerkiksi Enerkey tai Haahtela, mutta niiden käytössä ja hyödyntämisessä havaittiin eroja.

Joissakin kunnissa energiankulutustietoja tarkastellaan kuukausittain ja joissakin ainoastaan kerran vuodessa. Mikäli energiankulutustietoja tarkasteltaisiin kuukausittain, voidaan tarpeeton energiankulutus havaita nopeasti. Esimerkki tällaisesta voisi olla esimerkiksi tarpeettoman tehokkaalla oleva ilmanvaihto, joka näkyy energiankulutuksen kasvuna.

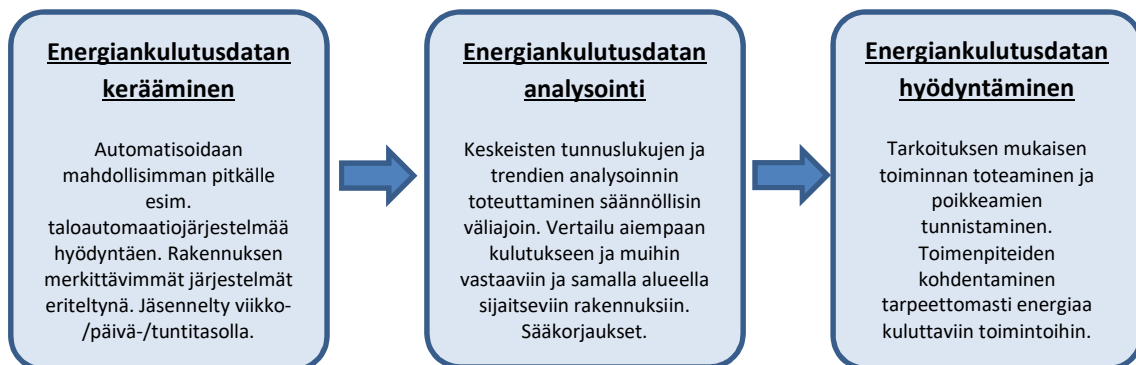
Energiankulutusdatan tarkastelutiheyden lisäksi merkittävää on se, millaisilta ajanjaksoilta ja miten jäsenneltynä energiankulutustietoja kerätään ja analysoidaan. Mikäli energiankulutusdata on jäsennelty vain kuukausitasolla, tuloksissa on merkittävää epätarkkuutta esimerkiksi sen mukaan, kuinka monta päivää ko. kuukaudessa on ja montako viikonloppua ko. jaksoon osuu. Palvelurakennuksia käytetään kuitenkin yleensä viikkorytmin mukaan ja energiankulutus pitäisikin olla jäsennelty vähintään viikoittain.

Rakennuksen energiatehokkuutta arvioitaessa on myös tärkeää tunnistaa rakennuksen merkittävimmät energiaa kuluttavat järjestelmät. Näiden järjestelmien energiankulutuksen erillismittarointi ja energiankulutuksen seuranta tuo analysointiin mahdollisuuden paikallistaa tarpeeton energiankulutus tarkasti ja nopeasti. Tällaisia erillismittaroitavia kohteita voisivat olla esimerkiksi suurimpien ilmanvaihtokoneiden lämmitys ja jäähdytys, käyttöveden lämmitys- ja kulutus sekä valaistus.

Tavanomaiset jo olemassa olevat mittaukset tukevat monenlaisia energiankulutusanalyysijä, joilla voidaan paikallistaa tarpeetonta energiankulutusta. Erillismittaroinnin järjestäminen ei välttämättä vaadi merkittävästi uusia investointeja. Varsinkin uusien rakennusten

taloautomaatiojärjestelmät tavallisesti tukevat erilaisten mittausten ja energiankulutusseurantojen tekemistä. Tarpeellisten fyysisten mittalaitteiden ollessa usein jo valmiiksi asennettuna saattaa seurannan järjestämisessä olla enää kyse vain seurannan ohjelmoinnista ja analysoinnin organisoinnista. Esimerkkinä tällaisesta tapauksesta voisi olla ilmanvaihdon lämmitys, josta automaatiojärjestelmä seuraa tavallisesti ilman lämpötiloja, ilmanvaihtokoneen ilmapvirtaa ja ko. koneen käyntiaikaa. Tällaiset tiedot riittävät ko. koneen lämmitysenergiankulutuksen laskemiseen ohjelmallisesti.

Useissa haastatelluissa kunnissa energiankulutusseurantaan kaivattiin nykyistä enemmän järjestelmällisyyttä. Energiankulutuksen analysointi tulisivat liittää kiinteäksi osaksi kuukausittaista rutiinia. Oheisessa kuvassa on esitetty ehdotus rutiininomaisen energiankulutusseurannan prosessin kuvaukseksi.



Energiankulutusdatan kerääminen ja hyödyntäminen. Rutiininomaisen prosessin kuvaus.

Energiankulutustietojen kerääminen, analysointi ja hyödyntäminen vaatii henkilöresursseja. Tehdyn selvityksen perusteella energiankulutuksen analysointi on usein em. resurssien puutteessa jäänyt pinnalliselle tasolle. Tarpeettomien energiankulutusten havaitseminen ja korjaaminen voi kuitenkin olla erittäin kannattavaa ja itse korjaavat toimenpiteet voidaan usein toteuttaa hyvin pienin kustannuksin, jolloin niiden takaisinmaksuaika on erittäin lyhyt. Lisäksi monipuolinen ja hyvin jäsennelty energiankulutusseuranta lisää huoltohenkilökunnan ja energiankulutustiedoista vastaavien henkilöiden kykyä tuntea heidän vastuullaan olevien rakennusten järjestelmien toimintaa ja energiankulutukseen vaikuttavia seikkoja.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Louhi, Lauri (2017) **Energiankulutustietojen analysointi ja hyödyntäminen**. Opinnäytetyö 79 s. + 29 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-talotekniikka.

Jalli, Jarkko (2017) **Sähköenergian kulutussenseuranta Pirkanmaan palvelurakennuksissa**. Opinnäytetyö 109 s. + 10 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikka, Sähköinen talotekniikka.

Pekkanen, Matias (2017) **Lämpöenergia- ja vesimittaukset Case-kohteissa**. Opinnäytetyö 47 s. + 10 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikka, LVI-talotekniikka.

Päivömaa, Iida (2016) **Energiatehokkuus Pirkanmaan alueen palvelurakennuksissa**. Opinnäytetyö 51 s. + 2 liites. Tampereen ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-tekniikka.

Talotekniikan lehtori, DI Antti Mäkinen (antti.makinen@tuni.fi)



Hyvän sisäilmaston varmistaminen takuuaikana

Takuuaikana merkittävä keino tavoiteltujen sisäilmaolosuhteiden ja rakennuksen toimivuuden varmistamiseksi on toisena käyttövuotena tehtävä toimivuustarkastelu.

Tutkimuksen tausta

Tiukentuneet energiamääräykset tuovat paksujen eristekerrosten ja aiempaa paremman rakennuksen tiiveyden lisäksi monimutkaisempia talotekniikan järjestelmiä, jolloin kokonaisuuden hallinta vaikeutuu. Kiireiset aikataulut, monimutkaisten talotekniikan järjestelmien työlääät säätötyöt sekä riittämätön valvonta johtavat usein siihen, että rakennus ja sen järjestelmät eivät toimi täysin suunnitellusti, kun rakennus otetaan käyttöön. Rakennuksen jo valmistuttua tarvitaan aktiivisia toimia, jotta rakennuksen toimivuudesta voidaan varmistua käyttötilanteessa. Tätä tehtävää varten tässä tutkimuksessa luotiin kirjallisuutta hyödyntäen prosessi hyvän sisäilmaston varmistamiseksi rakennuksen takuuaikana. Prosessia noudattamalla voidaan varmistaa, että rakennus toimii suunnitellusti ja sen sisäilmaston laatu täyttää sille asetetut tavoitteet. Prosessissa pitää myös varmistaa, että rakennus toimii myös tilanteessa, joissa rakennusta käytetäänkin joltain osin eri tavalla kuin mikä oli suunnittelun lähtökohtana.

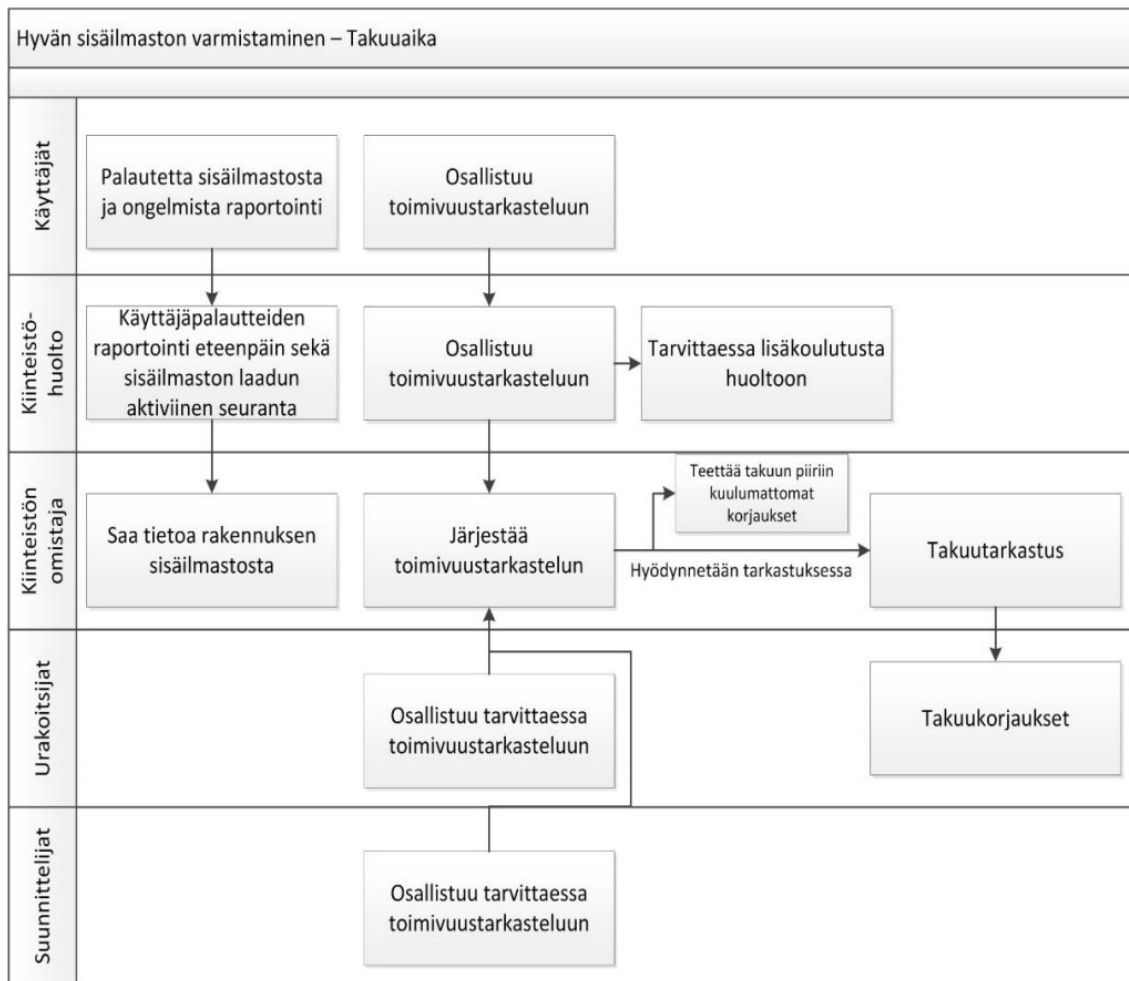
Tutkimustulokset ja suositukset

Käyttäjien kouluttamisella rakennuksen käyttöön on vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen ja sisäilmastoon. Kun käyttäjät on koulutettu käyttämään rakennuksen järjestelmiä, he osaavat säätää mieleisensä työskentelyolot energiatehokkaalla tavalla. Käyttökoulutuksella ja selkeillä käyttöohjeilla pystytään myös lisäämään käyttäjien hallinnan tunnetta omaan sisäympäristöönsä, millä on positiivinen vaikutus koettuun sisäympäristöön. Myös huoltohenkilöstön osaamisella rakennuksen yksilöllisistä ominaisuuksista ja järjestelmistä on merkitystä rakennuksen hyvän sisäilmaston varmistamisessa.

Tutkimuksen tuloksena saatiin prosessikuvaus, jota voi hyödyntää rakennushankkeissa takuuaikana hyvän sisäilmaston varmistamiseksi. Takuuaikana merkittävä keino hyvän sisäilmaston ja rakennuksen toimivuuden varmistamiseksi on toisena käyttövuotena tehtävä toimivuustarkastelu. Tutkimuksessa selvitettiin lisäksi toimivuustarkastelun kulku ja siihen kuuluvat tehtävät sekä niiden sisältö ja tehtäviin osallistujat.

Prosessin osat ovat jo nykyisin yleisesti tiedossa, mutta tutkimuksen havaintojen perusteella monet tehtävät tehdään puutteellisesti tai laiminlyödään kokonaan. Muutoksen prosessin käyttöönottoon tulee lähteä rakennushankkeisiin ryhtyviltä. Tilaaajan täytyy itse tiedostaa prosessin vaiheet sekä vaatia ja valvoa, että ne todella tehdään laadukkaasti. Ensimmäinen keino varmistaa hankeosapuolten sitoutuminen prosessin vaiheisiin on, että tehtävät ja niille asetettavat vaatimukset huomioidaan urakka- ja suunnittelusopimuksissa ja vaiheiden suorittamiset sidotaan maksuieriin. Toisaalta sitoutumista voisi vahvistaa myös palkitsemalla esimerkiksi käyttökoulutuksen oppimistulosten perusteella.

Hyvän sisäilmaston varmistaminen -prosessikuvaus. Kuvassa esitetään hyvän sisäilmaston varmistamisen prosessi takuuajana.



Toimivuustarkastelu on yksi merkittävimmistä työkaluista hyvän sisäilmaston sekä rakennuksen toimivuuden varmistamiseksi takuuajana. Tarkastelun tuloksien perusteella voidaan tehdä korjaavia toimenpiteitä sekä vaatia takuun piiriin kuuluvia korjauksia urakoitsijoilta. Tarkastelun havaittiin olevan toimiva työkalu myös hieman pidempään käytössä olleiden rakennusten sisäilmaston ja toimivuuden parantamiseen.

Tarpeenmukaisesti säätyvä ilmanvaihto on energiatehokkaan rakennuksen edellytys. Se myös luo selkeän tarpeen toimivuustarkastelulle. Case-kohteissa havaittiin esimerkiksi, että jo uudessakin rakennuksessa mitta-anturit voivat olla rikki tai tarpeenmukaisen ilmanvaihdon vyöhykesäädöt pahasti epätasapainossa toimimattomien säätöpeltien takia.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Simola, N., 2016. **Hyvän sisäilmaston varmistaminen rakennuksen takuuajana.** Diplomityö.

Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa:

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24195/simola.pdf?sequence=1>

Projektipäällikkö Olli Teriö (2017 asti)

Projektipäällikkö Juhani Heljo (juhani.heljo@tuni.fi)



Korjaushankkeiden sisäilmaprosessien kuvaukset

Sisäilmaprosessit on jaettu kolmeen osakaavioon. Ensimmäinen kaavio kuvaa toimenpiteet terveyshaittaepäilyistä korjaus- tai purkupäätökseen. Toisessa kaaviossa esitetään korjaushankkeen tehtäviä korjauspäätöksestä rakennuksen vastaanottoon asti ja viimeisessä kaaviossa esitetään käyttöönoton ja jatkuvan toimivuudenvarmistamisen menetelmiä.

Tausta ja tavoitteet

Palvelurakennusten terveyshaittaepäilyihin liittyy monenlaisia toimintatapoja ja käytäntöjä ja monilla organisaatioilla on jo olemassa omia toimintaprosessikuvauksia. Prosessikuvausten lähtökohtana on kuitenkin oman organisaation osapuolet ja prosessi saattaa olla osittain sattumalta syntyneiden käytäntöjen kuvaamista.

Sisäilmaprosessikaavioilla pyritään selkeyttämään toimintatapoja sekä tuomaan esiin hyviä käytäntöjä palvelurakennusten terveyshaittaepäilytilanteissa, korjaustapojen suunnittelussa ja toteutuksessa sekä jatkuvan toimivuuden varmistuksessa. Prosessikuvauksissa on esitetty projektin eri osapuolten vastuita, velvollisuuksia ja tehtäviä hyvän sisäilmaston aikaansaantiin.

Tulokset ja johtopäätökset

Ensimmäisessä prosessikaaviossa on esitetty asumisterveysasetukseen ja työsuojelulainsäädäntöön perustuvat toimenpiteet terveyshaittaepäilyistä korjaus- tai purkupäätökseen asti. Käytännössä työterveyslaitoksen ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen ja Valviran asumisterveysasetuksen soveltamisohje luovat pohjan toimenpiteille. Ensimmäinen prosessi päättyy palvelurakennuksen kokonaisvaltaiseen arviointiin, jonka seurauksena syntyy päätös korjaamisesta tai purkamisesta. Toisessa kaaviossa esitetään tutkijatyönä arvioituja tehokkaita menetelmiä korjausrakennushankkeen sisäilmakysymysten suunnittelun ja toteutuksen ohjaamiseen. Rakennuttajalla, suunnittelijoilla ja urakoitsijoilla on korjausprojektin aikana omat vastuualueensa ja tehtävänsä, jotka vaikuttavat korjaushankkeen sisäilmaprosessin hallinnan onnistumiseen. Kolmannessa kaaviossa esitetään toimenpiteitä, joilla voidaan varmistaa ja edesauttaa rakennuksen jatkuvaa toimivuutta. Käyttöönotto- ja vastaanottovaiheen toimenpiteillä, tarkastuksilla, katselmuksilla ja mittauksilla on suuri merkitys rakennuksen toimivuuteen, ja oikein kohdennetuilla toimenpiteillä voidaan rakennuksen sisäilmastoa hallita paremmin, lisätä käyttäjien viihtyvyyttä sekä edesauttaa rakennuksen terveellisyyttä. Jatkuvan toimivuuden varmistuksessa on tärkeää huomioida myös takuuajana suoritettavat toimenpiteet ja tehtävät sekä käytön aikana suoritettavat toimenpiteet, toimivuuden varmistusprosessit ja kiinteistön kunnon seuranta ja ennakoiva toiminta.

Yksinkertaistettu kuva palvelurakennuksen sisäilmaprosesseista. Sisäilmaprosessit on jaettu kolmeen osaprosessiin, koska niiden osapuolet eroavat merkittävästi toisistaan.



Lisätietoja ja yhteydenotot

Tampereen tilapalvelut. **Sisäilmaoppaat ja -ohjeistukset.** Saatavissa:

<https://tampereentilapalvelut.fi/materiaalipankki/sisailmaoppaat-ohjeistukset/>.

Suomen yliopistokiinteistöt, 2015. **Tietopaketti sisäilmatoiminnasta konsulteille.** Saatavissa:

<https://sykoy.fi/wp-content/uploads/tietopaketti-sisilmatoiminnasta-konsulteille.pdf>.

Tampereen teknillinen yliopisto, 2015. **Energiatohokkaan rakentamisen työmaaopas.** Saatavissa:

https://www.motiva.fi/files/11193/Energiatohokkaan_rakentamisen_tyomaaopas.pdf.

Tampereen kaupunki, 2014. **Rakennuksen talotekniikan toimivuustarkastelu.** Saatavissa:

http://www.tampere.fi/tilakeskus/material/uusikansio/9jA2b76cA/Ohje_07_Toimivuustarkastelu.pdf.

Projektipäällikkö Juhani Heljo (juhani.heljo@tuni.fi)

Projektitutkija Ulrika Uotila (ulrika.uotila@tuni.fi)



COMBI-hankkeen suositukset energiatehokkaaseen rakentamiseen – COMBI 8

Hyvä energiatehokkuus on yksi laadukkaan rakentamisen monista ominaisuuksista. Sen parantaminen vaikuttaa moniin eri asioihin, jotka tulee ottaa huomioon rakennusprosessissa ja rakennuksen käytön aikana.

Onnistunut energiatehokas rakentaminen edellyttää kokonaisvaltaista ja oikea-aikaista asioiden tarkastelua sekä ehjän ketjun rakentamista suunnittelusta toteutukseen ja käyttöön.

Korkealaatuisen lopputuloksen edellytyksenä on lisäksi rakennushankkeessa mukana olevien toimijoiden hyvä ammattitaito ja yhteistyö sekä riittävät resurssit.

Johdanto

Tässä suosituslistassa esitellään joukko COMBI-tutkimushankkeen perusteella valittuja tekijöitä, joiden on katsottu olevan keskeisessä roolissa rakennusten energiatehokkuuden ja muiden ominaisuuksien parantamisessa. Niiden yhteydessä on esitetty kuhunkin aihepiiriin liittyviä suosituksia, jotka samalla havainnollistavat kutakin tekijää. Suositukset koskevat ensisijaisesti julkisia palvelurakennuksia, kuten kouluja, päiväkoteja ja tuetun palveluasumisen rakennuksia.

Yhdistävänä teemana seuraavassa esitettyjen tekijöiden kesken on, että rakennusten tulee olla toimivia ja hyvin käyttötärpeisiin vastaavia. Hyvä energiatehokkuus on nähtävissä tällöin yhtenä laadukkaan rakentamisen monista ominaisuuksista. Tämän tavoitteen saavuttaminen edellyttää kokonaisvaltaista ja oikea-aikaista asioiden tarkastelua sekä ehjän ketjun rakentamista rakennusten suunnittelusta niiden käyttöön ja ylläpitoon. Siinä onnistumiseksi rakennusprosessissa ja käyttövaiheessa mukana olevilta henkilöiltä tarvitaan hyvää yhteistyökykyä ja ammattitaitoa. Myös riittävien resurssien varmistaminen on tärkeää asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi.

Pitkästä suosituslistasta huolimatta on tärkeää muistaa, että olemassa olevissa rakennuksissa moni asia on myös hyvin. Tutkimushankkeen luonteen vuoksi seuraavassa on kuitenkin listattu sellaisia asioita, joita voitaisiin parantaa nykytilanteeseen verrattuna. Lisäksi kaikki kohdat eivät koske kaikkia rakennuksia, mutta jokainen kohta koskee osaa rakennuksista.

Hankkeen johtopäätökset ja suositukset on kuvattu tarkemmin COMBI-hankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportissa. Hankkeeseen tutustumisen helpottamiseksi kustakin tutkimusaiheesta on laadittu myös lyhyt tuloskortti ja siihen liittyvä esitysmateriaali. Eri tutkimusosioiden tulokset on esitetty yksityiskohtaisemmin hankkeen taustajulkaisuissa.

Suosituksat

1. Käyttö ja käyttäjät: Rakennukset tulee suunnitella niiden käyttäjien ja käytön mukaisista lähtökohdista.

- Rakennuksen osan käyttö edellyttää usein käytön ajan olosuhteiden ylläpitämistä suuressa osassa rakennusta. → Ryhmittele tilat vyöhykkeiksi itsenäisesti käytettävien tilojen tai tilaryhmien perusteella ja suunnittele kulkuyhteydet sekä tekniset järjestelmät tämän mukaisesti.
- Energiatohokkuusvaatimukset ja arkkitehtoninen näkemys eivät aina vastaa toisiaan. → Koska muotoon ja ulkonäköön liittyvillä seikoilla on suhteellisen vähän vaikutusta energiatohokkuuteen, ei arkkitehtonisesta ja toiminnallisesta laadusta tule tinkiä.
- Taloteknisten järjestelmien käyttöliittymät eivät ole aina havainnollisia, jolloin järjestelmää ei osata käyttää tehokkaasti. → Tee huonetilojen säätimistä ja rakennusautomaatiojärjestelmien käyttöliittymistä selkeitä ja käytöstä yksinkertaista. Tee energiankulutus näkyväksi, jotta poikkeamiin voidaan puuttua nopeasti.
- Ilmanvaihtojärjestelmiin ja huonetilojen vaikeapääsyisiin paikkoihin voi kertyä huomattava määrä pölyä ja muuta likaa. → Muista huolehtia huonetilojen lisäksi myös talotekniikan puhdistettavuudesta ja puhdistamisesta.

2. Yhteistyö ja jatkuvuus: Eri suunnittelualojen yhteistyötä ja rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden välistä jatkuvuutta tulee edistää entisestään.

- Energiatohokkuuteen tähtäävät talotekniset ja rakenteelliset ratkaisut lisätään lineaarisessa rakennusprosessissa arkkitehtisuunnitteluun jälkeenpäin ja niillä pyritään ratkaisemaan mahdolliset arkkitehtisuunnittelun aiheuttamat epäedulliset vaikutukset. → Tee talotekniset ja rakenteelliset valinnat yhdessä arkkitehtonisten suunnitteluratkaisujen kanssa.
- Rakenteiden ja talotekniikan toimivuutta ei aina selvitetä tai raportoida yhdessä, vaikka sisäilman olosuhteet riippuvat molemmista. → Tilaa rakennusten sisäilma- ja kosteustekninen kuntotutkimus sekä ilmanvaihtotekninen kuntotutkimus yhtenä kokonaisuutena. Työ on mahdollista toteuttaa joko yhden toimijan toimesta tai usean tahon yhteistyönä.
- Järjestelmien toimintaperiaatteita ei aina tunneta, jolloin niitä ei myöskään osata säätää ja käyttää tehokkaasti. → Suunnittelijoiden, urakoitsijoiden ja laitetoimittajien tulee olla mukana rakennuksen käyttöönotossa.

3. Mitattavat tavoitteet: Energiatohokkuudelle ja sisäolosuhteille tulee asettaa mitattavissa olevat tavoitteet ja niiden toteutumista tulee seurata.

- Pinta-alapohjainen energiatohokkuuden tarkastelu suosii tehotonta tilankäyttöä eikä ota riittävästi huomioon arkkitehtisuunnittelun vaikutusta. → Tarkastele rakennuksen energiankulutusta suhteessa siitä saatavaan hyötyyn, kuten henkilökäyttötuntien määrään.

- Yksittäisen rakennuksen energiatehokkuustavoitteiden toteutumista ei ole mahdollista arvioida, jos suunniteltujen ja toteutuneiden arvojen taustalla olevat määritelmät ja oletukset poikkeavat toisistaan. → Rakennukselle ja sen keskeisille järjestelmille tulee määrittää suunnitteluvaiheessa tavoite-energiankulutuslaskelma hyväksytyine virherajoineen. Vertaa toteutuneita tietoja säännöllisesti suunniteltuihin arvoihin.
- Energiankulutustietoja kerätään rakennuksissa usein suurista kokonaisuuksista, jolloin mahdollisten virhetilanteiden syiden selvittäminen ei onnistu ilman huomattavia lisäselvityksiä. → Mittauksissa tulee siirtyä yksittäisten järjestelmien ja keskeisten laitteiden mittauksiin, jotta mittaustulosten tulkinta ja niistä tehtävät johtopäätökset selkiytyvät.
- Palvelurakennusten normaali käyttö etenee viikoittain, mutta energiankulutuksen seuranta tehdään paljon kuukausittain. → Kulutusseurantaraportit tulee laatia viikkoperusteisesti, minkä lisäksi niissä tulee olla tietoa ilmanvaihdon käyntiajoista, työ- ja lomaviikoista sekä tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen käynnistämisestä ja sammuttamisesta syksyisin ja keväisin.
- Energiankulutusmittaukset vievät aikaa ja niissä menetetään tietoa ajan suhteen tapahtuvista muutoksista ja tehonkäytöstä. → Rakennuksissa tulee hyödyntää enemmän sähkötehon mittauksia, esimerkiksi seuraamalla isojen kulutusyksiköiden tehonkäyttöä suhteessa suunnittelijoiden toimittamiin tavoitearvoihin ja -rajoihin.

4. Vikasietoisuus ja toimintavarmuus: Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan suunnittelussa ja taloteknisten järjestelmien käytössä tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota vikasietoisuuteen ja varautua toimivuuden puutteisiin.

- Kosteus- ja mikrobivaurioita esiintyi kuntotutkimusaineistossa hyvin monenlaisissa rakenneratkaisuissa. Lisäksi ilmastonmuutos yhdistettynä puutteellisesti toteutettuun lämmöneristyksen lisäykseen rasittaa jatkossa entistä enemmän varsinkin rakenteiden ulko-osia. → Suunnittele rakenteisiin useita toimivuutta edistäviä yksityiskohtia ja varmuutta vaurioitumisrajoihin nähden.
- Osassa tutkituista kouluista ja päiväkodeista esiintyi suuria ilmanpaine-eroja ulkovaipan yli, kun taas osassa kohteista paine-erot pysyivät pieninä. → Seuraa paine-eroja mittauksin esimerkiksi ilmanvaihdon säätämisen yhteydessä, eri käyttötilanteissa ja eri vuodenaikoina. Tee paine-eromittaukset jatkuvatoimisesti eri puolilta rakennusta ja korjaa ilmanvaihdon säätöjä niiden perusteella.
- Suuret ilmanpaine-erot voivat aiheuttaa haitallisia vaikutuksia rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle ja sisäilman laadulle. → Rakennusten tilajärjestelyjä, rakenneratkaisuja, taloteknisiä järjestelmiä sekä niiden seuranta ja ohjausta tulee kehittää ja parantaa niin, että rakennusten paine-erot pysyvät maltillisina, eivätkä aiheuta haitallisia seurauksia.
- Betonin suhteellisen kosteuden mittaukseen liittyy useita mahdollisia virhelähteitä, jotka tulee hallita. → Varmista mittalaitteen ja siinä käytettävän suodinmateriaalin sopivuus tuoreen betonin mittauksiin laitteen valmistajalta. Kondenssilanteen

välttämiseksi jatkuvatoimiset mittalaitteet suositellaan asennettavaksi vasta, kun on saavutettu riittävän alhainen suhteellinen kosteus (noin 90 % RH) ja riittävän vakaat lämpötilaolosuhteet.

5. Lähtötiedot ja dokumentointi: Käytä ja tarvittaessa määritä luotettavia lähtötietoja rakennuksen suunnittelua ja toteutusta varten. Tallenna rakennuksiin liittyvä tieto selkeään muotoon, jotta sitä voidaan hyödyntää myöhemmin.

- Energiatohokkuuden määräystenmukaisuuden osoittamiseksi laskettu ostoenergiankulutus vastaa heikosti rakennusten todellista energiankulutusta. → Suunnittele energiatohokkuuden parantamistoimenpiteet aina todellista käyttöä vastaavilla lähtötiedoilla. Vasta tämän jälkeen tarkista määräystenmukaisuuden täyttyminen vakiokäytön mukaisilla lähtötiedoilla. Myös määräystenmukaisuuden osoittamisessa käytettävien lähtötietojen tarkkuutta tulee parantaa.
- Rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia materiaaliominaisuusarvoja puuttuu edelleen huomattava määrä, kuten myös tietoa niiden vaihtelusta. Rakenteiden käyttäytyminen voi poiketa materiaalikokeiden mukaisesta tilanteesta, aiheuttaen lisää virhettä laskentatuloksiin. Lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien lisäksi myös muista ominaisuuksista tarvitaan lisää tietoa, kuten materiaalien homehtumisherkkydestä. → Rakennusmateriaalien ominaisuuksien määrittämistä tulee edistää ja tuotteiden valmistajia tulee velvoittaa niiden määrittämiseen. Kun teet rakenteiden laskentatarkasteluja, etsi niiden pohjaksi referenssitapauksia ja tee herkkyystarkasteluja.
- Puhalluseristeiden suuri ilmanläpäisevyys altistaa yläpohjan eristekerroksen sisäiselle konvektiolle, jolloin yläpohjan todellinen lämpöhäviö voi olla merkittävästi suurempi kuin laskennallinen arvo. → Valitse yläpohjaan pienen ilmanläpäisevyyden omaava puhalluseriste tai levyeriste. Ota sisäisen konvektion vaikutus yläpohjan lämpöhäviö- ja energiankulutuslaskelmissa riittävällä tavalla huomioon.
- Rakennuksia koskeva dokumentaatio on usein puutteellista vaikeuttaen toimivuuden arviointia ja esimerkiksi kuntotutkimusten suorittamista. → Kirjaa talteen rakennuksen suunnittelua ja toteutusta koskevat tiedot siten, kuin olisit itse tulossa tekemään rakennuksen todellisen energiatohokkuuden ja toimivuuden selvitystä ensimmäistä kertaa.
- Järjestelmien säätöperiaatteet ja laitteiden suositeltu käyttötapa unohtuvat tai hukkuvat vuosien varrella. → Tilaa ilmanvaihtosuunnittelijalta kirjallinen selostus ilmanvaihtojärjestelmän toimintaperiaatteista tilakokonaisuuksittain, sisältäen säätöperiaatteet eri käyttötilanteissa ja perusteet tarpeenmukaisen ilmanvaihdon eri tehotasoihin. Tilaa urakoitsijalta tai suoraan laitetoimittajalta laitteiden ja järjestelmien käyttöohjeet ja laite ne saataville suoraan käyttöpaikalle.

6. Ennakointi: Kiinteistönpidon tulee olla ennakoivaa ja suunnitelmallista.

- Rakenne- ja taloteknisten järjestelmien toimivuuspuutteet eivät välttämättä tule helposti esille, ennen kuin niistä aiheutuu haitallisia seurauksia. → Pyri tekemään vaikeasti havaittavat ilmiöt näkyviksi, kuten laittamalla nauhoja ilmavirtaukseen, merkkivaloja laitteisiin ja tarkastusluukut tai -pisteet rakenteisiin.
- Sisäilma- ja rakennetekniset kuntotutkimukset tehdään usein vasta siinä vaiheessa, kun rakennuksessa on muodostunut jo epäily sisäilmahaitasta. → Sisäilma-, rakenne- ja ilmanvaihdotekniset kuntotutkimukset tulee suorittaa ennakoivasti ja niissä havaitut puutteet korjata ajoissa.
- Rakennusautomaatiojärjestelmiä ei useinkaan käytetä siinä laajuudessa, kuin mitä järjestelmien ominaisuudet mahdollistaisivat. → Rakennusautomaatiojärjestelmiin tulee liittää mittausdatan seuranta ja näihin liittyviä hälytysrajoja, jotta kiinteistön ylläpitohenkilökunta voi selvittää ylitysten ja alitusten syyt.

7. Resurssit: Tavoitteiden saavuttamiseksi ihmisten aikaa ja osaamista tulee käyttää riittävästi, mutta samalla tehokkaasti kohdistaen.

- Rakennusten energiatehokkuus ja toimivuus synnyttävät paljon työtä ja kysymyksiä, mutta toiminta on sirpaleista. → Järjestä mahdollisuuksia yhteistyöhön ja olemassa olevien resurssien yhdistämiseen, jotta yksittäisten tahojen kokemukset ja hyvät käytännöt hyödyttäisivät mahdollisimman laajaa joukkoa.
- Hankeprosessin alussa tehtävä tarveselvitys muodostaa perustan kaikille myöhemmin tehtäville päätöksille, mutta sen toteutustapa vaihtelee ja siinä voi olla puutteita. → Muista varata riittävästi resursseja eri vaihtoehtojen teknisten, toiminnallisten ja taloudellisten ominaisuuksien vertailemiseksi ennen päätöksentekoa.
- Rakennusten kunnon hyvin tuntevan ylläpitohenkilöstön ja sisäilma-asiantuntijoiden aika kuluu usein suurelta osin vikailmoituksiin reagoimiseen sekä esiintyneiden sisäilmaepäilyjen ja -ongelmien selvittämiseen. → Järjestä riittävästi resursseja, jotta näiden henkilöiden osaaminen saadaan hyödynnettyä rakennusten suunnitteluvaiheessa ja ennakoivassa kiinteistönpidossa.

8. Taloudellisuus: Kustannustehokkaimpien suunnitteluratkaisujen löytämiseksi tulee arvioida kattavasti erilaisia vaihtoehtoja ja tilanteita.

- Rakennuksen investointikustannuksilla on usein liian suuri painoarvo verrattuna rakennuksen käyttövaiheen kustannuksiin. → Suosi suunnitteluratkaisuja, jotka ovat kustannustehokkaita rakennuksen koko elinkaaren näkökulmasta.
- Rakennusten taloudellisuus, energiatehokkuus ja sisäolosuhteet muodostuvat useiden toisiinsa kytkeytyneiden tekijöiden monimutkaisena yhteisvaikutuksena. → Ota tarkasteluihin avuksi tapaukseen soveltuvia optimointimenetelmiä ja -työkaluja kustannusoptimaalisten suunnitteluratkaisujen löytämiseksi.

- Uusien palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi on jo Suomessa tehty monia erilaisia toimenpiteitä, kuten parannettu vaipan lämmöneristystasoa. → Nykytasosta selvästi matalampaan energiankulutukseen pääseminen edellyttää tyypillisesti joko kustannusoptimaalisen tason ohi menemistä tai investointeja uusiin taloteknisiin järjestelmiin ja omaan energiantuotantoon. Uusien palvelurakennusten vaipan lämmöneristystason parantaminen nykymääräysten vertailutasoa paremmaksi ikkunoita lukuunottamatta ei ole enää taloudellista.

Lisätietoja ja yhteydenotot

Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Tapio Kaasalainen, Pirkko Pihlajamaa, Olli Teriö, Juha Jokisalo, Petri Annala, Pirkko Harsia, Markku Hedman, Juhani Heljo, Kari Kallioharju, Antti Kauppinen, Paavo Kero, Henna Kivioja, Taru Lehtinen, Tero Marttila, Malin Moisio, Antti Mäkinen, Jukka Paatero, Tuomas Raunima, Annu Ruusala, Paula Sankelo, Pauli Sekki, Kai Sirén, Eero Tuominen, Olli Tuominen, Ulrika Uotila & Sakari Uusitalo 2019. Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 168. 45 s. + 111 liites. Tampere. Saatavissa:

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4306-7>

Professori Juha Vinha (juha.vinha@tuni.fi)

Tohtorikoulutettava Anssi Laukkarinen (anssi.laukkarinen@tuni.fi)

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 527
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O.B. 527
FI-33101 Tampere, Finland

ISBN 978-952-15-4305-0 (nid.)
ISBN 978-952-15-4306-7 (PDF)
ISSN 2489-6950